ФИЗИЧЕСКОЕ ОБОЗРѢНІЕ

1904 г. ТОМЪ 5 No. 2

Зарядъ іона

К. К. Баумгарта[1]).

1. Девятнадцатый вѣкъ въ исторіи физики ознаменовался дѣятельностью не имѣющаго себѣ равнаго геніальнаго ученаго. Этотъ ученый, Михаилъ Фарадей, въ течен е своей жизни произвелъ рядъ открытій, которыя совершенно перевернули наши взгляды на многія основныя явленія природы. Эти открытія, конечно, не могли не вызвать всеобщаго удивленія, и заслуги Фарадея были оцѣнены по достоинству уже его современниками.

Но, признавая громадное значеніе явленій, открытыхъ Фарадеемъ, современники крайне отрицательно относились къ тѣмъ объясненіямъ, которыя придумывалъ Фарадей для своихъ явленій. Это и понятно. Для объясненія наблюденныхъ имъ явленій Фарадей создалъ цѣлый рядъ образовъ новыхъ, оригинальныхъ, совершенно не подходившихъ къ тому кругу идей, въ которомъ вращались его современники. Поэтому неудивительно, что даже Максвелль, математически выразившій образы Фарадея и явившійся посредникомъ между Фарадеемъ и традиціонною наукою, даже Максвелль не понялъ взглядовъ Фарадея на электролизъ.

„Назовемъ, для краткости, пишетъ Максвелль въ своемъ Treatise on Electricity and Magnetism (Vol. I, § 260), постоянный мо-

[1]) Сообщеніе, сдѣланное 8-го мая 1903 г. въ Физическомъ Институтѣ С.-Петербургскаго Университета, въ собраніи преподавателей физики.

лекулярный зарядъ *молекулою электричества*... Это выраженіе, какъ бы оно ни было несовершенно и какъ бы мало оно ни гармонировало съ остальнымъ содержаніемъ этой книги, все-таки поможетъ намъ ясно высказать все то, что мы знаемъ объ электролизѣ"... А нѣсколько далѣе: „Эта теорія молекулярныхъ зарядовъ можетъ служить для запоминанія большого числа фактовъ объ электролизѣ; но мало вѣроятно, чтобы къ тому времени, когда мы познаемъ истинную природу электролиза, мы хоть что либо сохранили изъ теоріи молекулярныхъ зарядовъ; тогда у насъ будетъ твердая основа для того, чтобы создать истинную теорію электрическаго тока и освободиться отъ этихъ предварительныхъ теорій".

Гельмгольцъ[1]) первый вполнѣ понялъ взгляды Фарадея и развилъ ихъ въ своей знаменитой фарадеевской рѣчи, произнесенной въ Лондонѣ во время чествованія памяти Фарадея (5 Апр. 1881 г.). Эта рѣчь замѣчательна тѣмъ, что въ ней впервые употреблено выраженіе „электрическій атомъ", впервые торжественно провозглашено было то понятіе, которое—подъ названіемъ электрона, корпускула, электріона или кванта — легло въ основу цѣлаго ученія о сущности электрическихъ явленій.

Цѣлью настоящаго сообщенія является выясненіе связи новаго ученія объ электричествѣ съ прошлымъ, а именно съ ученіемъ Фарадея объ электролизѣ, затѣмъ выясненіе того, что электрическій атомъ есть дѣйствительно физическая постоянная и наконецъ указаніе тѣхъ способовъ, при посредствѣ которыхъ эта постоянная была опредѣлена для жидкихъ электролитовъ и для газовъ. Первая, историческая часть моего сообщенія главнымъ образомъ основана на указанной уже фарадеевской рѣчи Гельмгольца.

2. Не мало ученыхъ занималось изученіемъ связи между электрическими и химическими явленіями послѣ того, какъ Никольсонъ и Карлейль открыли разложеніе воды токомъ вольтова столба. Уже до Фарадея существовала и пользовалась признаніемъ ученаго міра цѣлая электрохимическая теорія.

Эта теорія, высказанная Берцеліусомъ, не была научно обоснована количественными опытами, а исходила изъ аналогіи съ извѣстнымъ рядомъ Вольты. Берцеліусъ распредѣлилъ всѣ

---

[1]) Helmholtz, Wissenschaftliche Abhandlungen III, 69 (Faraday Lecture).

элементы въ электрохимическій рядъ, на одномъ (положительномъ) концѣ котораго находились калій, натрій, барій, кальцій, а на другомъ (отрицательномъ)—кислородъ, хлоръ, бромъ. Два атома элементовъ этого ряда, приходя въ соприкосновеніе, электризовались одинъ положительно, другой отрицательно. Величина зарядовъ зависитъ отъ химическаго сродства и она тѣмъ больше, чѣмъ дальше отстоятъ эти элементы въ рядѣ Берцеліуса. На подробностяхъ этой теоріи мы не будемъ останавливаться.

Когда Фарадей занялся электролизомъ, онъ, по мѣткому выраженію Гельмгольца, поставилъ себѣ тотъ вопросъ, съ котораго долженъ былъ начать всякій химикъ; это былъ вопросъ о *количествѣ* продуктовъ разложенія, вызваннаго токомъ данной величины въ теченіе даннаго времени. Дать отвѣтъ на этотъ вопросъ и значило найти основной электрохимическій законъ. Извѣстно, какъ остроумно Фарадей преодолѣлъ всѣ трудности вопроса, трудности немалыя, такъ какъ во времена Фарадея не было средствъ для полученія вполнѣ постоянныхъ токовъ и не были выработаны методы измѣренія токовъ. Фарадей помѣщалъ послѣдовательно въ одну и ту же цѣпь нѣсколько сосудовъ съ электролитами и опредѣлялъ количество продуктовъ разложенія въ этихъ сосудахъ. Изъ своихъ опытовъ Фарадей вывелъ извѣстный основной законъ электролиза.

Количества вещества, выдѣляющіяся на электродахъ, пропорціональны количеству электричества, протекшаго чрезъ электролитъ, и находятся между собою въ отношеніи ихъ химическихъ эквивалентовъ. Извѣстны та картина явленія, которую нарисовалъ себѣ Фарадей, и соотвѣтствующая терминологія. Эта терминологія теперь не только общепринята для явленій электролиза, но существуютъ серіозныя основанія предполагать, что она можетъ быть распространена и на электрическія явленія въ газахъ.

Фарадей предположилъ, что дѣйствіе тока на электролитъ заключается въ слѣдующемъ. Молекулы этого электролита распадаются на двѣ части, одну, заряженную положительно, и другую—отрицательно. Эти части, которыя Фарадей назвалъ іонами, подъ вліяніемъ электрическихъ силъ приходятъ въ движенія, причемъ положительные іоны (катіоны) движутся къ катоду, а отрицательные іоны (аніоны) движутся къ аноду; у электродовъ онѣ отдаютъ свои заряды и выдѣляются или же вступаютъ во вторичную реакцію.

Итакъ опредѣленное количество электричества выдѣляетъ всегда опредѣленное количество іоновъ.

Количество іоновъ, выдѣлившихся отъ даннаго количества электричества, оказалось совершенно независящимъ отъ химическаго сродства частей электролита; такимъ образомъ первое количественное изслѣдованіе электрохимическаго явленія нанесло роковой ударъ теоріи Берцеліуса.

Цѣлый рядъ работъ различныхъ ученыхъ вполнѣ подтвердилъ взгляды Фарадея и строгую правильность его законовъ[1]). Работы Гитторфа надъ химическимъ измѣненіемъ раствора у электродовъ дали возможность: 1) съ несомнѣнностью обнаружить фактъ переноса іоновъ вдоль электролита и 2) опредѣлить численную величину, характеризующую этотъ переносъ іоновъ, такъ называемое *число переноса.*

Числа переноса въ связи съ электропроводностью даютъ возможность *изъ экспериментальныхъ данныхъ* вывести самую скорость іоновъ. Эта скорость оказалась, благодаря громадному тренію, которое іоны испытываютъ въ жидкости, чрезвычайно малою (для іона водорода $3 \cdot 3.10^{-3}$ cm/sec при паденіи потенціала 1 volt/cm, для другихъ іоновъ еще меньше).

Далѣе Кольраушъ нашелъ чрезвычайно важный законъ, что въ слабыхъ растворахъ скорость даннаго іона подъ вліяніемъ даннаго паденія потенціала совершенно опредѣленна и не зависитъ отъ того, движутся-ли въ томъ же или въ прямо противоположномъ направленіи еще другіе іоны. Это такъ называемый *законъ свободнаго странствованія* или *законъ независимости движенія іона.*

Параллельно съ экспериментальнымъ развитіемъ и подтвержденіемъ правильности фарадеевской картины явленія электролиза шло подтвержденіе вѣрности его законовъ.

Затрудненіе, возникавшее при разсмотрѣніи законовъ Фарадея, заключалось въ слѣдующемъ. Въ настоящее время мы имѣемъ возможность обнаружить на гальванометрахъ такіе слабые токи, которые лишь въ сотни лѣтъ могутъ разложить одинъ

---

[1]) Читатели *Физическаго Обозрѣнія* знакомы съ превосходнымъ обзоромъ профессора Соколова: „Современное состояніе ученія объ электролизѣ“ (*Физич. Обозр.*, т. 2 (1902), стр. 176 и 227); поэтому я позволю себѣ значительно сократить эту часть своей статьи.

миллиграммъ воды. Поэтому наблюдается такое явленіе: токъ проходитъ чрезъ электролитъ, гальванометръ его обнаруживаетъ, а разложенія нѣтъ. Вообще извѣстно, что видимое разложеніе требуетъ извѣстнаго минимума электродвижущей силы. Поэтому возникаетъ вопросъ, происходитъ-ли разложеніе на самомъ дѣлѣ, или же токъ можетъ проходить чрезъ электролитъ, не разлагая его (благодаря металлической электропроводности электролита).

Опыты обнаружили, что правильно первое предположеніе и что любой токъ вызываетъ движеніе іоновъ. Эти іоны, достигая электродовъ, приводятъ ихъ въ особое состояніе поляризаціи, поляризуютъ ихъ. Фактъ поляризаціи можетъ служить доказательствомъ разложенія электролита и въ томъ случаѣ, когда всѣ другіе критеріи оказываются недостаточными. Проф. Соколовъ обнаружилъ возникновеніе поляризаціи при электродвижущей силѣ въ 0·001 volt; нѣтъ никакихъ основаній считать 0·001 volt необходимымъ минимумомъ электродвижущей силы; это просто предѣлъ чувствительности нашихъ приборовъ. Такимъ образомъ строгая правильность закона Фарадея доказана.

Гельмгольцъ объяснилъ явленіе поляризаціи и необходимость опредѣленной электродвижущей силы для видимаго разложенія электролита. При любой электродвижущей силѣ іоны электролита приходятъ въ движеніе и движутся къ электродамъ; вслѣдствіе этого у каждаго электрода образуется слой іоновъ обратнаго знака. Такимъ образомъ электроды превращаются въ два конденсатора громадной емкости, ибо слой іоновъ отстоитъ отъ электрода всего на разстояніе того же порядка, что и радіусъ сферы дѣйствія молекулярныхъ силъ. Въ образованіи этихъ слоевъ и заключается явленіе поляризаціи. Видимое разложеніе электролита возможно только тогда, когда іоны будутъ отдавать свои заряды электродамъ. Очевидно, необходимъ извѣстный минимумъ электродвижущей силы для того, чтобы совершить работу разряженія конденсатора такой громадной емкости.

Что касается теорій электролиза, то онѣ съ теченіемъ времени нѣсколько мѣнялись. Первая теорія, высказанная Гротгусомъ, еще предполагала силы химическаго сродства между іонами электролита; электрическія силы должны предолѣть эти силы сродства. Напротивъ того теорія Гельмгольца разсматриваетъ только электрическія силы и считаетъ свободными всѣ іоны жидкаго электролита. Теорія Аррениуса представляетъ

отчасти возвращеніе къ прежнимъ воззрѣніямъ; она допускаетъ возможность того, что часть іоновъ электролита несвободна; но Аррениусъ все-таки ближе къ Гельмгольцу, чѣмъ къ Клаузіусу, который въ своей теоріи электролиза, допускалъ возможность существованія въ электролитѣ свободныхъ іоновъ рядомъ съ цѣлыми молекулами.

3. Какой же выводъ вытекаетъ изъ этого длиннаго, но необходимаго предисловія? Этотъ выводъ былъ сдѣланъ Гельмгольцемъ и составляетъ кульминаціонный пунктъ его фарадеевской рѣчи; въ этомъ выводѣ заключается ея историческое значеніе. Это мѣсто рѣчи Гельмгольца такой громадной важности, что я позволю себѣ привести его дословно.

„Теперь мы можемъ высказать законъ Фарадея такимъ образомъ: на каждомъ сѣченіи электролитическаго проводника всегда имѣютъ мѣсто эквивалентныя электрическое и химическое движенія. Точно опредѣленное количество положительнаго или отрицательнаго электричества движется съ каждымъ одновалентнымъ іономъ или съ каждымъ эквивалентомъ многовалентнаго іона; оно неразлучно сопровождаетъ его при всѣхъ движеніяхъ по жидкости; это количество мы можемъ назвать *электрическимъ зарядомъ іона.*

„Я прошу васъ замѣтить, что мы до сихъ поръ говорили только о явленіяхъ, доступныхъ наблюденію: движеніе электричества можетъ быть измѣрено для всего сѣченія любого проводника. То же относится къ переносу составныхъ частей электролита. Эквиваленты химическихъ элементовъ и соотвѣтствующіе электрическіе заряды суть числа, выражающія лишь наблюдаемыя соотношенія. Объясненіе закона постоянныхъ отношеній существованіемъ неразрушимыхъ атомовъ можетъ показаться гипотезою. Однако въ данный моментъ мы не знаемъ ни одной достаточно ясной и разработанной теоріи, которая была бы въ состояніи объяснить факты, наблюдаемые въ химіи такъ же просто и логично, какъ атомистическая теорія современной химіи.

Правда примѣненная къ электрическимъ процессамъ эта гипотеза въ связи съ закономъ Фарадея приводитъ къ нѣсколько неожиданному выводу, *ибо если мы допустимъ существованіе атомовъ химическихъ элементовъ, то неизбѣжно должны предполо-*

жить, что и электричество, положительное и отрицательное, также раздѣлено на элементарныя количества, которыя играютъ роль атомовъ электричества".

Вскорѣ послѣ фарадеевской рѣчи Гельмгольца англійскій ученый Стоней заявилъ свой пріоритетъ, указывая на то, что онъ уже нѣсколько раньше высказывалъ приблизительно подобные же взгляды и даже придумалъ для электрическаго атома особое названіе „электронъ". Несомнѣнно Стоней правъ и имѣетъ право на пріоритетъ, но въ его статьяхъ нѣтъ того научнаго полета мысли, той философской широты взгляда, которая характеризуетъ рѣчь Гельмгольца. Поэтому не будетъ несправедливымъ утвержденіе, что именно Гельмгольцъ явился провозвѣстникомъ новаго ученія, именно Гельмгольцъ указалъ, что новое ученіе есть слѣдствіе изъ воззрѣній Фарадея, воззрѣній, которыя около этого времени, благодаря трудамъ Максвелля, получили наконецъ перевѣсъ.

Всѣмъ конечно извѣстно, что понятіе іонъ, введенное Фарадеемъ для жидкихъ электролитовъ, играетъ большую роль въ настоящее время. Имъ пользуются для объясненія цѣлаго ряда электрическихъ явленій, наблюдаемыхъ въ газахъ. Соотвѣтственно этому и „электрическій атомъ", электронъ привлекается къ объясненію весьма многихъ явленій, которыя прежде оставались совершенно непонятными. Движенія свободныхъ или связанныхъ съ матеріею электроновъ легко и логично объясняютъ явленія Зеемана и катодныхъ лучей, искровой разрядъ и вольтову дугу, проводимость газовъ и явленіе радіоактивности. Длинный рядъ фактовъ объясненъ этою новой теоріею; рядъ опытовъ произведенъ для провѣрки ея. Но не подлежитъ сомнѣнію, что самымъ важнымъ подтвержденіемъ этой теоріи явился бы фактъ, что величина, которую мы назвали зарядомъ іона, есть дѣйствительно постоянная физическая величина, одна и та же и въ жидкомъ электролитѣ, и въ газахъ, и гдѣ бы мы ее ни наблюдали.

Эта провѣрка іонной теоріи дѣйствительно была произведена и блестяще удалась.

4. Опредѣленіе заряда іона въ жидкихъ электролитахъ есть дѣло простого подсчета. Такіе подсчеты были сдѣланы Рихарцемъ (1891) и Стонеемъ (1891) на основаніи слѣдующихъ соображеній.

Изъ опытовъ лорда Рэлея и братьевъ Кольраушъ слѣдуетъ' что 1 coul. выдѣляетъ на катодѣ 0·001118 gr. серебра, а одна электромагнитная единица электричества (= 10 coul.) выдѣляетъ въ 10 разъ больше, т. е. 0·01118 gr. серебра. Эквивалентъ серебра (относительно водорода) = 108; слѣдовательно 10 coul выдѣляетъ 0·01118/108 = 0·0001036 gr. водорода; но такая масса водорода занимаетъ 1·16 с. cm. при 0^0 и 76 cm. Въ 1 с. cm. водорода имѣется приблизительно 10^{20} частицъ или $2 \cdot 10^{20}$ атомовъ; слѣд. въ 1·16 с. cm. водорода помѣщается $1{\cdot}16{\cdot}2.10^{20}$ атомовъ. Отсюда зарядъ одного іона

$$e = 1/2{\cdot}32.10^{20} = 4{\cdot}31.10^{-21} \text{ эл-магн. ед.}$$

или

$$e = 4{\cdot}31.10^{-21}.3.10^{10} = 1{\cdot}3.10^{-10} \text{ эл.-ст. ед.}$$

Въ виду того, что величину e мы нашли дѣленіемъ извѣстнаго заряда на число атомовъ, несущихъ этотъ зарядъ, а это послѣднее число извѣстно намъ далеко неточно, то и зарядъ e опредѣляется лишь приблизительно.

5. Зарядъ іона въ газахъ былъ опредѣленъ три раза Дж. Дж. Томсономъ и одинъ разъ Вильсономъ. Въ 1898 г. Дж. Дж. Томсонъ опредѣлилъ e для газа, іонизированнаго рёнтгеновскими лучами, въ 1899 г. для газа, іонизированнаго ультрафіолетовымъ свѣтомъ, и въ 1903 г. для газа, іонизированнаго радіемъ; во всѣхъ трехъ опытахъ употреблялся одинъ и тотъ же методъ. Подъ вліяніемъ ультрафіолетоваго свѣта, радія или X-лучей газъ іонизировался, при чемъ частицы его распадались на іоны, обладающіе каждый опредѣленнымъ зарядомъ e. Въ іонизированный газъ вводились насыщенные водяные пары, которые при внезапномъ расширеніи (довольно слабомъ) конденсировались въ облачко тумана (это явленіе было открыто Р. Гельмгольцомъ и затѣмъ изслѣдовано Айткеномъ и Вильсономъ). Зная начальную температуру и степень расширенія, можно опредѣлить массу воды, сконденсированной въ единицѣ объема.

Облачко тумана постепенно опускалось внизъ. Стоксъ далъ формулу, связывающую скорость паденія облачка (v) съ діаметромъ капель (a):

$$v = \frac{2}{9} \frac{ga^2}{\mu},$$

гдѣ g—ускореніе силы тяжести, и μ—коэффиціентъ вязкости среды.

Очевидно, что, наблюдая скорость паденія облачка, мы можемъ по предыдущей формулѣ найти число капель въ единицѣ объема; дѣйствительно, мы уже знаемъ массу сконденсированной воды, а изъ наблюденія надъ паденіемъ облачка находимъ массу каждой капли. Такимъ-то остроумнымъ способомъ Дж. Дж. Томсонъ сосчиталъ число капель въ туманѣ. Далѣе Томсонъ дѣлаетъ предположеніе (весьма, повидимому, вѣроятное), что каждая капелька образуется вокругъ одного іона; тогда число капель тумана даетъ намъ число іоновъ. Іонизированный газъ находился между обкладками заряженнаго конденсатора и его іоны, перемѣщаясь по силовымъ линіямъ, переносили свои заряды, образуя конвективный токъ; отдавая свои заряды обкладкамъ конденсатора, іоны сравнивали ихъ потенціалы; электрометромъ, соединеннымъ съ одною изъ обкладокъ, можно было измѣрить этотъ конвективный токъ. Пусть A означаетъ поверхность конденсатора, n—число іоновъ въ единицѣ объема газа, u—скорость ихъ и e—зарядъ каждаго изъ нихъ; тогда конвективный токъ въ газѣ или количество электричества, доставляемое въ единицу времени одной изъ обкладокъ конденсатора, будетъ

$$Q = Aneu .$$

Если зарядъ Q, доставляемый электрометру, отклоняетъ его стрѣлку на a дѣленій, а измѣненіе разности потенціаловъ квадрантовъ электрометра на 1 volt соотвѣтствуетъ b дѣленіямъ, то a/b будетъ число вольтъ, на которое измѣняется разность потенціаловъ въ данномъ случаѣ; если извѣстна электроемкость нашего электрометра, то по сказанному отклоненію его стрѣлки можно опредѣлить и зарядъ Q, получаемый обкладкою конденсатора. Величину u опредѣлялъ Зелени; u_0, т. е. скорость іона при паденіи потенціала въ 1 volt/cm. оказалась $= 1{\cdot}4$ cm./sec.; при паденіи потенціала въ V volt/cm., скорость перемѣщенія іоновъ будетъ $u = Vu_0$.

Теперь мы знаемъ Q, A и u; слѣд. по предыдущей формулѣ можемъ вычислить ne; но изъ наблюденія надъ скоростью паденія облачка мы уже опредѣлили n; слѣдовательно можемъ вычислить и e, т. е. зарядъ іона въ газахъ.

Изъ своихъ опытовъ Дж. Дж. Томсонъ вывелъ такія величины для e въ электростатическихъ единицахъ:

1898 г.	1899 г.	1903 г.
$e = 6{\cdot}5.10^{-10}$	$6{\cdot}8.10^{-10}$	$3{\cdot}4.10^{-10}$

Послѣднее число Томсонъ считаетъ наиболѣе надежнымъ, такъ какъ при его опредѣленіи были устранены нѣкоторыя причины погрѣшностей.

Весною 1903 г. Вильсонъ опредѣлилъ e по нѣсколько усовершенствованному методу, который не заключаетъ предположенія, что каждая капелька содержитъ только одинъ іонъ. У Вильсона облачко пара опускалось между двумя обкладками конденсатора, причемъ наблюдалась скорость его паденія при существованіи электрическаго поля между пластинками и безъ поля. Уравненія, которыми пользовался Вильсонъ были

$$v = \frac{2}{9}\frac{ga^2}{\mu} \quad \text{и} \quad \frac{v}{v_1} = \frac{mg}{mg + Xe}.$$

Первое уравненіе намъ извѣстно; во второмъ уравненіи m есть масса одной капли, а X напряженіе поля. Достаточно было опредѣлить изъ опыта v, v_1 и X, чтобы найти e. Подобные опыты дали $e = 2 \cdot 10^{-10}$ эл.-ст. единицъ.

Далѣе Вильсонъ указалъ, что капля образуется около каждаго іона только въ случаѣ слабаго расширенія газа; въ противномъ случаѣ капля можетъ образоваться около 2 и даже 3 іоновъ, и тогда для іона получается зарядъ кратный отъ $2 \cdot 10^{-10}$, т. е. $4 \cdot 10^{-10}$ или $6 \cdot 10^{-10}$.

Принимая во вниманіе трудность опытовъ, нельзя не признать результаты Дж. Дж. Томсона и Вильсона блестящими и вполнѣ совпадающими съ данными Рихарца и Стонея для заряда іона въ жидкихъ электролитахъ.

6. Я бы могъ на этомъ кончить, но не могу не привести въ заключеніе еще одного подсчета, сдѣланнаго Гельмгольцемъ въ той же его Фарадеевской рѣчи и свидѣтельствующаго о громадности тѣхъ силъ, которыя обнаруживаются въ электролитѣ. Если образовать 1 mgr. воды горѣніемъ водорода въ кислородѣ, то выдѣляется въ видѣ тепла такая энергія, которая достаточна для поднятія той же массы воды на высоту 1600000 m. Спрашивается, каковы должны быть электрическія силы, чтобы онѣ были въ состояніи разложить такое прочное соединеніе. Мы знаемъ, что 10 coul. (3.10^{10} эл.-ст. ед.) разлагаютъ 0·9476 mgr. воды; слѣд. $3 \cdot 10^{10}/0 \cdot 9476$ эл.-ст. единицъ электричества разлагаютъ 1 mgr. воды. Сила, съ которою притягиваются іоны одного миллиграмма воды, если ихъ помѣстить на разстояніи 1 km., будетъ

$$F = \frac{E^2}{r^2} \frac{1}{981} \text{ gr.-вѣса};$$

такъ какъ здѣсь $E = 3 \cdot 10^{10}/0 \cdot 9476$ и $r = 10^5$ cm., то $F = 102180$ kgr.-вѣса.

Итакъ электрическія силы притяженія іоновъ такъ велики, что іоны около миллиграмма, разведенные на 1 km., притягиваются съ силою, равною вѣсу 102180 kgr. Это притяженіе въ 393700 билліоновъ разъ больше притяженія по закону тяготѣнія. Послѣ этого понятно, что Гельмгольцъ полностью раздѣлялъ взглядъ Фарадея, предполагавшаго, что химическое сродство есть лишь одно изъ проявленій электрическихъ силъ.

Предѣлы видимаго

П. А. Зилова.

1. Хотя при изученіи окружающаго насъ міра мы пользуемся всѣми органами чувствъ, но чаще всего дѣлаемъ это при помощи глазъ, такъ какъ органъ зрѣнія самый чувствительный и надежный; часто даже глазомъ мы замѣняемъ другіе органы [1]). Впрочемъ и глазъ не всегда достаточно чувствителенъ, поэтому многого изъ того, что находится передъ нашими глазами, мы не видимъ: одно слишкомъ мало, другое слишкомъ далеко, третье недостаточно ярко освѣщено, четвертое окрашено въ невидимый цвѣтъ. Все это налагаетъ предѣлы зрѣнію. Но въ стремленіи къ познанію неизвѣстнаго человѣкъ дѣлаетъ усилія „расширить" свои чувства—видѣть невидимое, слышить неслышное, чувствовать неосязаемое. О результатахъ этой борьбы въ области невидимаго здѣсь и будетъ рѣчь.

---

[1]) Такъ напр. Руд. Кёнигомъ построенъ рядъ приборовъ, назначеніе коихъ состоитъ въ томъ, чтобы сдѣлать звуки доступными глазу и позволить изслѣдованіе звуковыхъ явленій производить глазомъ, а не ухомъ.

2. Опытъ показываетъ, что разсматриваемый предметъ долженъ быть достаточно освѣщенъ; иначе онъ невидимъ.

За единицу яркости освѣщенія принимаютъ такъ называемую метръ-свѣчу, сокращено обозначаемую чрезъ „*МК*" (Meter-Kerze); это освѣщеніе поверхности нормальною свѣчею, поставленною отъ нея въ разстояніи одного метра; если свѣча поставлена въ разстояніи 2, 3, ... метровъ отъ поверхности, то послѣдняя освѣщается съ яркостью 1/4, 1/9, ... *МК*.

Нормальною свѣчею (*NK*) называютъ парафиновую свѣчу съ пламенемъ въ 5 cm. длины; такая свѣча даетъ единицу свѣта. Удобнѣе за эталонъ свѣта употреблять амильацетатовую лампу Гефнера съ пламенемъ въ 4 cm. длина; яркость такой лампы $= 0 \cdot 71$ *NK*.

Тумлирцъ изъ калориметрическихъ опытовъ (съ прозрачнымъ и непрозрачнымъ калориметрами) нашелъ, что гефнеровская лампа испускаетъ $1 \cdot 86$ gr.-cal/sec. или 78.10^6 erg/sec., изъ коихъ только $2 \cdot 4^0/_0$, т. е. $1 \cdot 9.10^6$ erg/sec приходится на долю свѣта; это количество свѣта высылается свѣчею по всѣмъ направленіямъ пространства. Около источника свѣта опишемъ сферу радіусомъ въ 1 cm.; поверхность этой сферы будетъ 4π □ cm.; слѣд. на □ cm., поставленный въ разстояніи 1 cm. отъ свѣчи, падаетъ свѣта $1 \cdot 9.10^6/4\pi = 1 \cdot 5.10^5$ erg/sec. Это число называется *механическимъ эквивалентомъ свѣта*. Метръ-свѣча есть количество свѣта, падающее отъ нормальной свѣчи на □ cm., помѣщенный въ разстояніи 1 m.; такъ какъ соотвѣтствующій тѣлесный уголъ $= 1/100^2$ предыдущаго, то

$$1\, MK = 15 \frac{\text{erg}}{\text{sec}}.$$

При освѣщеніи въ 1 *МК*, глазъ (діаметръ зрачка $= 3$ mm) получаетъ 1 erg въ каждую секунду. Для нагрѣванія 1 gr. воды на 1°Ц. такой притокъ энергіи долженъ продолжаться въ теченіе года съ четвертью. Вотъ какъ чувствителенъ глазъ! Но это далеко еще отъ предѣла замѣтной яркости: мы видимъ звѣзды даже 6-ой величины, представляющіяся, какъ свѣча въ разстояніи 11 km. Слѣд. предѣльная яркость около 10^{-8} *МК*., что соотвѣтствуетъ $1 \cdot 5.10^{-7}$ erg/sec; для нагрѣванія 1 gr. воды на 1°Ц. такой притокъ энергіи долженъ бы продолжаться больше милліона лѣтъ.

Предметы, яркость коихъ меньше этого предѣла, можно наблюдать при помощи фотографіи, которая въ данномъ случаѣ чувствительнѣе глаза. Тогда какъ дѣйствіе свѣта на глазъ обусловливается его яркостью, дѣйствіе на фотографическую пластинку обусловливается количествомъ падающаго на него свѣта; послѣ часового напряженія глазъ видитъ предметъ не лучше, чѣмъ послѣ одного взгляда: свѣтовыя впечатлѣнія въ глазѣ не суммируются; напротивъ того дѣйствія свѣта на чувствительную пластинку суммируются, такъ что чѣмъ дольше экспозиція, тѣмъ сильнѣе отпечатокъ. На этомъ основано фотографированіе „невидимыхъ звѣздъ", которымъ теперь занимаются многія обсерваторіи. Для этого два рефрактора—одинъ обыкновенный, другой съ фотографическою камерою на мѣстѣ окуляра—располагаютъ одинъ рядомъ съ другимъ и соединяются вмѣстѣ; часовымъ механизмомъ они приводятся въ движеніе такъ, чтобы ихъ оси сохраняли неизмѣнное направленіе въ пространствѣ. Смотря въ первый рефракторъ, пересѣченіе его нитей наводятъ на одну изъ видимыхъ звѣздъ и открываютъ объективъ второго рефрактора: на его чувствительной пластинкѣ фотографируются какъ видимыя, такъ и невидимыя звѣзды. Такъ какъ на правильность хода часового механизма полагаться никогда нельзя, то постоянно слѣдитъ въ первую трубу и время отъ времени поправляютъ ея положеніе, приводя визируемую звѣзду на пересѣченіе нитей. Когда наблюдатель захочетъ прервать фотографированіе, онъ закрываетъ объективъ второй трубы; передъ возобновленіемъ фотографированія наблюдатель наводитъ визируемую звѣзду на пересѣченіе нитей и открываетъ объективъ второй трубы. Такимъ образомъ одну и ту же экспозицію можно продолжать двѣ и болѣе ночи.

Прилагаемый рисунокъ (фиг. 1) представляетъ копію съ фотографіи Шейнера, полученной имъ на потсдамской обсерваторіи 8 и 9 февр. 1901 г. Рисунокъ изображаетъ небольшой участокъ неба вблизи ε Orionis; экспозиція продолжалась 8 часовъ; посрединѣ рисунка вышла видимая звѣзда, чрезъ-чуръ передержанная; маленькіе бѣлые кружки представляютъ невидимыя звѣзды.

3. Въ эѳирѣ могутъ распространяться волны различныхъ длинъ; до сихъ поръ изслѣдованныя волны укладываются въ 50 октавахъ, начиная отъ длины 0·1 μ и кончая 1000 *km*; свѣто-

вын волны занимаютъ лишь одну октаву (0·4 μ — 0·8 μ); когда предметъ освѣщенъ лучами этой октавы, онъ можетъ быть видимъ; если же предметъ освѣщается лучами другихъ октавъ, то онъ невидимъ. Замѣтимъ, что двѣ низшія октавы (0·4 μ — 0·1 μ) занимаютъ ультрафіолетовые лучи, дѣйствующіе на фосфоресцирующія тѣла, и въ такомъ случаѣ становятся чувствительными для глаза.



Фиг. 1.

Не останавливаюсь на способахъ изслѣдованія лучей другихъ октавъ, такъ какъ они уже были подробно описаны на страницахъ этого журнала [1]).

4. Опытъ показалъ, что глазу представляются раздѣльными двѣ точки только въ томъ случаѣ, если онѣ видны подъ угломъ зрѣнія (съ вершиною въ узловой точкѣ глаза) не менѣе 1'; точки же, видимыя подъ меньшимъ угломъ, представляются слившимися; предметъ, видимый подъ угломъ меньшимъ 1', представляется точкою: концы такого предмета кажутся совпадающими. Предѣльный уголъ зрѣнія соотвѣтствуетъ 100 km. на поверхности луны и 1/40 mm. въ ближнемъ разстояніи отъ глаза.

Одни предметы, какъ небесныя тѣла, находятся въ неизмѣнныхъ отъ насъ разстояніяхъ; другіе, какъ земныя тѣла, могутъ быть какъ-угодно приближены къ наблюдателю. Уголъ зрѣнія, подъ которымъ мы видимъ тѣла первой категоріи, не зависитъ отъ насъ; такія тѣла можно разсмотрѣть, если соотвѣтствующій уголъ зрѣнія больше 1'; ихъ нельзя разсмотрѣть, если соотвѣтствующій уголъ зрѣнія меньше 1'. Но тѣла второй категоріи, казалось бы, всегда можно разсмотрѣть, стоитъ лишь настолько приблизить ихъ къ глазу, чтобы соотвѣтствующій уголъ зрѣнія превышалъ 1'. Но тутъ является новое ограниче-

---

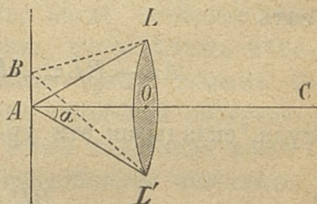
[1]) См. статью проф. П. Н. Лебедева, „Скала электромагнитныхъ волнъ въ эѳирѣ“ *Физ. Обозр.* 2 т. (1901 г.) стр. 49 и 217.

ніе: мы можемъ ясно видѣть предметъ только тогда, когда онъ отодвинутъ отъ глаза на разстояніе большее такъ называемаго *ближняго разстоянія* (около 20 cm.); къ меньшимъ разстояніямъ глазъ не въ состояніи приспособляться.

5. Изъ всѣхъ ограниченій зрительной способности самое важное то, которое обусловливается предѣломъ величины разсматриваемаго предмета. На преодолѣніе этого ограниченія, на переходъ за этотъ предѣлъ было потрачено всего больше усилій. Посмотримъ же теперь какими успѣхами увѣнчались эти усилія.

Если размѣры предмета меньше предѣльнаго, то его, какъ извѣстно, все-таки можно разсмотрѣть, вооружая глазъ оптическимъ инструментомъ—микроскопомъ или телескопомъ. Впрочемъ и эти инструменты не безгранично расширяютъ нашу зрительную способность; относительно телескопа это давно было замѣчено еще Гершелемъ и объяснено Фраунгоферомъ; относительно же микроскопа это было доказано сначала Гельмгольцомъ, а затѣмъ Аббе. Мы изложимъ здѣсь элементарную теорію вопроса, данную лордомъ Релеемъ и примѣняющуюся одинаково, какъ къ телескопу, такъ и къ микроскопу (Phil. Mag. (5) vol. 42, p. 169).

Представимъ себѣ, что въ оптическій инструментъ разсматриваются двѣ свѣтящія точки A и B (фиг. 2), и спросимъ себя, когда онѣ видны раздѣльно. Пусть LL' есть объективъ нашего оптическаго инструмента, AC его оптическая ось. Если C есть изображеніе точки A, даваемое объективомъ, то всѣ лучи, выходящіе изъ A, объективомъ сводятся съ *одинаковыми фазами* въ ея изображеніе C. Въ сущности C есть центръ диффракціоннаго кружка (образующагося отъ диффракціи лучей, прошедшихъ чрезъ отверстіе объектива), служащаго изображеніемъ точки А; при сказанныхъ условіяхъ здѣсь имѣется наибольшая яркость; въ сосѣднихъ точкахъ яркость меньше, ибо туда сходятся лучи, имѣющіе нѣсколько различныя фазы. Подобнымъ же образомъ лучи, идущіе изъ точки B, сходятся въ C съ различными фазами и тѣмъ болѣе различными, чѣмъ больше разстояніе AB. Если



фиг. 2.

это разстояніе очень мало, то разница фазъ хотя и существуетъ, но не оказываетъ замѣтнаго вліянія, и освѣщеніе C точкою B столь же значительно, какъ и точкою A (если только A и B одинаково ярки): все пространство между изображеніями точекъ A и B будетъ одинаково ярко освѣщено и эти изображенія не будутъ видны раздѣльными.

Понятно, что для раздѣльности нашихъ изображеній необходимо, чтобы изображеніе одной точки (напр. A) не освѣщалось другою точкою (B). Въ какомъ же разстояніи должны быть точки A и B одна отъ другой для того, чтобы это требованіе исполнялось? Точка B не будетъ освѣщать C въ томъ случаѣ, когда пути лучей, выходящихъ изъ B, проходящихъ чрезъ края объектива (L и L') и затѣмъ сходящихся въ C, различаются на волну, т. е. когда

$$BL' - BL = \frac{\lambda}{\nu}, \tag{1}$$

гдѣ λ длина волны въ воздухѣ и ν показатель преломленія среды, окружающей объективъ; дѣйствительно, тогда каждому лучу въ одной половинѣ (LBO) пучка найдется въ другой половинѣ ($L'BO$) лучъ противоположной фазы; такіе два луча взаимно уничтожаются.

Называя чрезъ α половину угловой апертуры объектива, т. е. уголъ (LAO), и полагая AB очень малымъ, можемъ написать

$$AL - BL = AB \sin\alpha, \quad BL' - AL' = AB \sin\alpha;$$

откуда, складывая эти ур-ія и замѣчая, что $AL = AL'$,

$$BL' - BL = 2\, AB \sin\alpha. \tag{2}$$

Обозначая AB чрезъ ε, имѣемъ изъ (1) и (2)

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2\nu \sin\alpha}. \tag{3}$$

6. Выведенную формулу примѣнимъ сначала къ телескопу.

Опредѣлимъ уголъ зрѣнія AOB, подъ которымъ виденъ удаленный предметъ; такъ какъ этотъ уголъ, который мы будемъ

обозначать чрезъ φ, очень малъ, то его можно измѣрить отношеніемъ AB къ AO:

$$\varphi = \frac{AB}{AO};$$

но AB есть величина предмета, ε, а изъ фиг. 2 видно, что $OL' = OA. \operatorname{tg}\alpha$, гдѣ OL' означаетъ половину поперечника объектива, которую мы обозначимъ R; такъ какъ въ данномъ случаѣ уголъ α очень малъ, то $\operatorname{tg}\alpha$ можно замѣнить чрезъ $\sin\alpha$; такимъ образомъ мы имѣемъ

$$\varphi = \frac{\varepsilon}{R}\sin\alpha;$$

опредѣливъ отсюда $\varepsilon\sin\alpha$ и подставивъ въ (3), находимъ формулу

$$\varphi = \frac{\lambda}{2R}, \tag{4}$$

въ которой принято $\nu = 1$, ибо въ данномъ случаѣ объективъ окруженъ воздухомъ. Вотъ предѣлъ разрѣшающей способности телескопа; при остальныхъ равныхъ условіяхъ этотъ предѣлъ тѣмъ значительнѣе, чѣмъ больше поперечникъ объектива. Поэтому-то для наблюденія двойныхъ звѣздъ, когда особенно важно, чтобы уголъ φ былъ по возможности малъ, устраиваютъ объективы большого поперечника. Въ настоящее время самымъ большимъ объективомъ снабженъ рефракторъ чикагской обсерваторіи; его поперечникъ имѣетъ 102 cm.; для этого телескопа $\varphi = 0{\cdot}1''$.

Казалось бы, что разрѣшающая способность телескопа можетъ безпредѣльно возростать съ увеличеніемъ поперечника объектива; но вѣдь вмѣстѣ съ этимъ возростаетъ толщина объектива и поглощеніе имъ свѣта; поэтому, увеличивая поперечникъ объектива, мы выгадываемъ съ одной стороны, но теряемъ съ другой; размѣръ чикагскаго объектива представляетъ крайній предѣлъ, до котораго можно итти при современномъ состояніи техники стекла. Впрочемъ если удастся изготовить болѣе прозрачное стекло, то этотъ предѣлъ можно будетъ еще отодвинуть.

7. Теперь примѣнимъ форм. 3 къ микроскопу. Изъ этой формулы видно, что предѣлъ разрѣшающей способности микроскопа тѣмъ значительнѣе, чѣмъ больше ν и $\sin\alpha$ и чѣмъ меньше λ. Первое изъ этихъ условій требуетъ, чтобы среда между объективомъ и разсматриваемымъ предметомъ обладала возможно бóльшимъ показателемъ преломленія; это приводитъ насъ къ иммерсіонной системѣ: на покровное стекло микроскопическаго препарата помѣщаютъ каплю сильно преломляющей жидкости—воды ($\nu = 1{\cdot}33$), кедроваго масла ($\nu = 1{\cdot}52$) или однобромонафталина ($\nu = 1{\cdot}66$), въ которую и погружаютъ объективъ микроскопа. Второе условіе требуетъ по возможности приблизить объективъ къ разсматриваемому предмету; въ короткофокусныхъ объективахъ $\sin\alpha$ почти равенъ единицѣ. Третье условіе требуетъ, чтобы предметъ освѣщался лучами съ возможно короткими волнами; но волны свѣтящихъ лучей лежатъ въ предѣлахъ $0{\cdot}8\mu$ и $0{\cdot}4\mu$; впрочемъ при фотографированіи можно пользоваться ультрафіолетовыми лучами, волны коихъ простираются до $0{\cdot}1\mu$; но непрозрачность стеколъ для ультрафіолетовыхъ лучей является большимъ препятствіемъ для фотографированія при помощи крайнихъ ультрафіолетовыхъ лучей. Если наблюдать въ микроскопъ глазомъ, то надо принять $\lambda = 0{\cdot}5\mu$, $\nu = 1{\cdot}66$ и $\sin\alpha = 1$; тогда ε приблизительно равно 1/8 микрона; это крайній предѣлъ видимаго—предѣлъ, который кладется самою природою свѣта, независимо отъ степени совершенства микроскопа или свойствъ глаза. Лучшіе современные микроскопы достигаютъ указаннаго предѣла, и предметы меньшихъ размѣровъ изображаются въ немъ въ видѣ пятенъ съ размытыми краями.

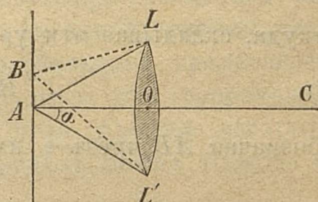
8. Но если мы лишены возможности разсматривать предметы меньшіе 1/8 микрона (видѣть ихъ форму и структуру), то нѣтъ-ли возможности хотя бы обнаружить существованіе такихъ *ультрамикроскопическихъ* предметовъ? Одно всѣмъ хорошо знакомое явленіе позволяетъ надѣяться, что этого можно достичь. Пылинки, плавающія въ воздухѣ и столь малыя, что при обыкновенныхъ условіяхъ остаются невидимыми, дѣлаются замѣтными въ узкомъ пучкѣ солнечныхъ лучей, впускаемыхъ въ темную комнату, если смотрѣть на этотъ пучокъ сбоку; конечно, при этомъ мы видимъ не самыя пылинки, а лишь дифракціонные кружки, обусловливаемые отраженнымъ отъ нихъ свѣтомъ. На этомъ фактѣ Зидентопфъ и Жигмонди основали свой способъ наблюденія ультрамикроскопическихъ частичекъ.

ніе: мы можемъ ясно видѣть предметъ только тогда, когда онъ отодвинутъ отъ глаза на разстояніе большее такъ называемаго *ближняго разстоянія* (около 20 cm.); къ меньшимъ разстояніямъ глазъ не въ состояніи приспособляться.

5. Изъ всѣхъ ограниченій зрительной способности самое важное то, которое обусловливается предѣломъ величины разсматриваемаго предмета. На преодолѣніе этого ограниченія, на переходъ за этотъ предѣлъ было потрачено всего больше усилій. Посмотримъ же теперь какими успѣхами увѣнчались эти усилія.

Если размѣры предмета меньше предѣльнаго, то его, какъ извѣстно, все-таки можно разсмотрѣть, вооружая глазъ оптическимъ инструментомъ—микроскопомъ или телескопомъ. Впрочемъ и эти инструменты не безгранично расширяютъ нашу зрительную способность; относительно телескопа это давно было замѣчено еще Гершелемъ и объяснено Фраунгоферомъ; относительно же микроскопа это было доказано сначала Гельмгольцомъ, а затѣмъ Аббе. Мы изложимъ здѣсь элементарную теорію вопроса, данную лордомъ Релеемъ и примѣняющуюся одинаково, какъ къ телескопу, такъ и къ микроскопу (Phil. Mag. (5) vol. 42 p. 169).

Представимъ себѣ, что въ оптическій инструментъ разсматриваются двѣ свѣтящія точки A и B (фиг. 2), и спросимъ себя, когда онѣ видны раздѣльно. Пусть LL' есть объективъ нашего оптическаго инструмента, AC его оптическая ось. Если C есть изображеніе точки A, даваемое объективомъ, то всѣ лучи, выходящіе изъ A, объективомъ сводятся съ *одинакими фазами* въ ея изображеніе C. Въ сущности C есть центръ диффракціоннаго кружка (образующагося отъ диффракціи лучей, прошедшихъ чрезъ отверстіе объектива), служащаго изображеніемъ точки A; при сказанныхъ условіяхъ здѣсь имѣется наибольшая яркость; въ сосѣднихъ точкахъ яркость меньше, ибо туда сходятся лучи, имѣющіе нѣсколько различныя фазы. Подобнымъ же образомъ лучи, идущіе изъ точки B, сходятся въ C съ различными фазами и тѣмъ болѣе различными, чѣмъ больше разстояніе AB. Если



фиг. 2.

это разстояніе очень мало, то разница фазъ хотя и существуетъ, но не оказываетъ замѣтнаго вліянія, и освѣщеніе C точкою B столь же значительно, какъ и точкою A (если только A и B одинаково ярки): все пространство между изображеніями точекъ A и B будетъ одинаково ярко освѣщено и эти изображенія не будутъ видны раздѣльными.

Понятно, что для раздѣльности нашихъ изображеній необходимо, чтобы изображеніе одной точки (напр. A) не освѣщалось другою точкою (B). Въ какомъ же разстояніи должны быть точки A и B одна отъ другой для того, чтобы это требованіе исполнялось? Точка B не будетъ освѣщать C въ томъ случаѣ, когда пути лучей, выходящихъ изъ B, проходящихъ чрезъ края объектива (L и L') и затѣмъ сходящихся въ C, различаются на волну (λ'), т. е. когда

(1) $$BL' - BL = \lambda';$$

дѣйствительно, тогда каждому лучу въ одной половинѣ (LBO) пучка найдется въ другой половинѣ ($L'BO$) лучъ противоположной фазы; такіе два луча взаимно уничтожаются.

Называя чрезъ α половину угловой апертуры объектива, т. е. уголъ (LAO), и полагая AB очень малымъ, можемъ написать

$$AL - BL = AB \sin \alpha, \quad BL' - AL' = AB \sin \alpha$$

откуда, складывая эти ур-ія и замѣчая, что $AL = AL'$,

(2) $$BL' - BL = 2AB \sin \alpha$$

Обозначая AB чрезъ ε, имѣемъ изъ (1) и (2)

(3) $$\varepsilon = \frac{\lambda'}{2 \sin \alpha}$$

6. Выведенную формулу примѣнимъ сначала къ телескопу.

Опредѣлимъ уголъ зрѣнія AOB, подъ которымъ виденъ удаленный предметъ; такъ какъ этотъ уголъ, который мы будемъ обозначать чрезъ φ, очень малъ, то его можно измѣрить отношеніемъ AB/AO:

$$\varphi = \frac{AB}{AO};$$

но AB есть величина предмета, ε, а изъ фиг. 2 видно, что $OL' = OA . \operatorname{tg} \alpha$, гдѣ OL' означаетъ половину поперечника объектива, которую мы обозначимъ R; такъ какъ въ данномъ случаѣ уголъ α очень малъ, то $\operatorname{tg}\alpha$ можно замѣнить чрезъ $\sin\alpha$; такимъ образомъ мы имѣемъ

$$\varphi = \frac{\varepsilon}{R} \sin \alpha;$$

опредѣливъ отсюда $\varepsilon \sin\alpha$ и подставивъ въ (3), находимъ

$$\varphi = \frac{\lambda}{2R}, \tag{4}$$

гдѣ λ—длина свѣтовой волны въ воздухѣ. Вотъ предѣлъ разрѣшающей способности телескопа; при остальныхъ равныхъ условіяхъ этотъ предѣлъ тѣмъ значительнѣе, чѣмъ больше поперечникъ объектива. Поэтому-то для наблюденія двойныхъ звѣздъ, когда особенно важно, чтобы уголъ φ былъ по возможности малъ, устраиваютъ объективы большаго поперечника. Въ настоящее время самымъ большимъ объективомъ снабженъ рефракторъ чикагской обсерваторіи; его поперечникъ имѣетъ 102 cm; для этого телескопа $\varphi = 0{\cdot}1''$.

Казалось бы, что разрѣшающая способность телескопа можетъ безпредѣльно возростать съ увеличеніемъ поперечника объектива; но вѣдь вмѣстѣ съ этимъ возростаетъ толщина объектива и поглощеніе имъ свѣта; поэтому, увеличивая поперечникъ объектива, мы выгадываемъ съ одной стороны, но теряемъ съ другой; размѣръ чикагскаго объектива представляетъ крайній предѣлъ, до котораго можно итти при современномъ состояніи техники стекла. Впрочемъ если удастся изготовить болѣе прозрачное стекло, то этотъ предѣлъ можно будетъ еще отодвинуть.

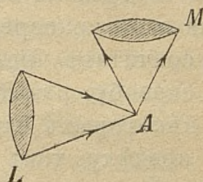
7. Теперь примѣнимъ форм. (3) къ микроскопу. По этой формулѣ λ' означаетъ длину свѣтовой волны въ средѣ, лежащей между разсматриваемымъ предметомъ и объективомъ; если чрезъ ν обозначимъ показатель преломленія этой среды и чрезъ λ длину соотвѣтствующей свѣтовой волны въ воздухѣ, то $\lambda' = \lambda/\nu$ и наша формула обращается въ

$$\varepsilon = \frac{\lambda}{2\nu \sin \alpha} \tag{5}$$

Отсюда видно, что предѣлъ разрѣшающей способности микроскопа тѣмъ значительнѣе, чѣмъ больше ν и $\sin\alpha$ и чѣмъ меньше λ. Первое изъ этихъ условій требуетъ, чтобы среда между объективомъ и разсматриваемымъ предметомъ обладала возможно бо́льшимъ показателемъ преломленія; это приводитъ насъ къ иммерсіонной системѣ: на покровное стекло микроскопическаго препарата помѣщаютъ каплю сильно преломляющей жидкости — воды ($\nu = 1{\cdot}33$), кедроваго масла ($\nu = 1{\cdot}52$) или однобромонафталина ($\nu = 1{\cdot}66$), въ которую и погружаютъ объективъ микроскопа. Второе условіе требуетъ по возможности приблизить объективъ къ разсматриваемому предмету; въ короткофокусныхъ объективахъ $\sin\alpha$ почти равенъ единицѣ. Третье условіе требуетъ, чтобы предметъ освѣщался лучами съ возможно короткими волнами; но волны свѣтящихъ лучей лежатъ въ предѣлахъ $0{\cdot}8\mu$ и $0{\cdot}4\mu$; впрочемъ при фотографированіи можно пользоваться ультрафіолетовыми лучами, волны коихъ простираются до $0{\cdot}1\mu$; но непрозрачность стеколъ для ультрафіолетовыхъ лучей является большимъ препятствіемъ для фотографированія при помощи крайнихъ ультрафіолетовыхъ лучей. Если наблюдать въ микроскопъ глазомъ, то надо принять $\lambda = 0{\cdot}5\mu$, $\nu = 1{\cdot}66$ и $\sin\alpha = 1$; тогда ε приблизительно равно 1/8 микрона; это крайній предѣлъ видимаго — предѣлъ, который кладется самою природою свѣта, независимо отъ степени совершенства микроскопа или свойствъ глаза. Лучшіе современные микроскопы достигаютъ указаннаго предѣла, и предметы меньшихъ размѣровъ изображаются въ немъ въ видѣ пятенъ съ размытыми краями.

8. Но если мы лишены возможности разсматривать предметы меньшіе 1/8 микрона (видѣть ихъ форму и структуру), то нѣтъ-ли возможности хотя бы обнаружить существованіе такихъ *ультрамикроскопическихъ* предметовъ? Одно всѣмъ хорошо знакомое явленіе позволяетъ надѣяться, что этого можно достичь. Пылинки, плавающія въ воздухѣ и столь малыя, что при обыкновенныхъ условіяхъ остаются невидимыми, дѣлаются замѣтными въ узкомъ пучкѣ солнечныхъ лучей, впускаемыхъ въ темную комнату, если смотрѣть на этотъ пучокъ сбоку; конечно, при этомъ мы видимъ не самыя пылинки, а лишь диффракціонные кружки, обусловливаемые отраженнымъ отъ нихъ свѣтомъ. На этомъ фактѣ Зидентопфъ и Жигмонди основали свой способъ наблюденія ультрамикроскопическихъ частичекъ.

Прозрачное тѣло съ плавающими или взвѣшенными въ немъ непрозрачными частицами (растворъ, цвѣтное стекло и т. п.) освѣщается солнечными лучами, сводимыми въ одну точку A (фиг. 3) собирающею линзою L, и освѣщенное мѣсто разсматривается съ помощью микроскопа (объективъ котораго изображенъ въ M), помѣщеннаго такъ, чтобы ни одинъ изъ освѣщающихъ лучей не попадалъ въ него; находящіяся въ освѣщенномъ такимъ образомъ мѣстѣ посторонніе непрозрачныя частицы представляются свѣтлыми кружками на темномъ фонѣ.



Фиг. 3.

Рубиновое стекло, окрашенное золотомъ, представляется совершенно однороднымъ даже въ лучшіе микроскопы; изслѣдуя такое стекло своимъ способомъ, Зидентопфъ и Жигмонди видѣли въ немъ вкрапленныя частицы золота.

Описаннымъ пріемомъ можно не только обнаруживать существованіе вкрапленныхъ или взвѣшенныхъ частицъ, но можно наблюдать и нѣкоторыя ихъ свойства. Такъ Рельманъ, разсматривая этимъ способомъ водные растворы нѣкоторыхъ красокъ, не только обнаружилъ взвѣшенныя въ водѣ частицы красокъ, но наблюдалъ, какъ эти частицы непрерывно двигались: однѣ изъ нихъ быстро колебались, другія медленно качались, третьи описывали дуги; характеръ движенія измѣнялся вѣроятно въ зависимости отъ величины и природы частицъ.

Какой же величины частицы можно „видѣть" такимъ способомъ? Если назовемъ α_1 и α_2 угловыя апертуры освѣтительной линзы и микроскопнаго объектива, ds—поверхность освѣщаемой частицы, k—удѣльную яркость освѣщающихъ лучей и g—яркость диффрактированнаго частицею свѣта, то между этими величинами существуетъ связь:

$$g = \frac{k}{2} \pi \sin^2\alpha \sin^2\alpha_1 . ds$$

Въ опытахъ Зидентопфа и Жигмонди съ рубиновымъ стекломъ $\sin\alpha = 0{\cdot}5$, $\sin\alpha_1 = 1{\cdot}3/1{\cdot}5$, $k = 10^3\ HK/mm^2$; такъ что предѣльной яркости $g = 10^{-8} MK$ соотвѣтствовало $ds = 36 \square\ \mu\mu$. Такимъ образомъ описанный способъ позволяетъ замѣчать частицы, линейные размѣры которыхъ около 6 $\mu\mu$.

Въ опытахъ съ рубиновыми стеклами, содержащими частицы золота, Зидентопфъ и Жигмонди имѣли возможность непосредственно оцѣнить величины послѣднихъ, съ одной стороны зная содержаніе золота въ данномъ объемѣ стекла (золото предполагалось распредѣленнымъ равномѣрно), а съ другой стороны сосчитавъ число частицъ въ объемѣ, освѣщенномъ по новому способу; размѣры частицъ, такимъ образомъ опредѣленные, въ нѣкоторыхъ стеклахъ были очень близки къ указанному выше предѣлу; такъ въ одномъ стеклѣ они колебались между 7·6 и 10·22 $\mu\mu$, въ другомъ отъ 9·6 до 15 $\mu\mu$.

Этотъ предѣлъ уже близокъ къ атомнымъ размѣрамъ (діаметръ атома около 1 $\mu\mu$) и во всякомъ случаѣ разъ въ десять меньше микроскопнаго предѣла. Впрочемъ указанный выше предѣлъ примѣненія новаго способа не фиксированъ и съ усиленіемъ освѣщенія (т. е. съ увеличеніемъ k) его можно будетъ отодвинуть еще дальше.

Задачи освѣтительной техники

О. Луммера[1]

13. *Осуществленіе чернаго тѣла.* Прежде, чѣмъ искать законъ лучеиспусканія чернаго тѣла, надо было осуществить это „черное“ лучеиспусканіе, сдѣлать его доступнымъ для опытовъ; но до самого послѣдняго времени всѣ попытки къ тому были безуспѣшны.

Правда старались косвеннымъ путемъ вывести законъ чернаго лучеиспусканія, располагая тѣла по степени ихъ „черноты“, и изъ ихъ лучеиспусканія, экстраполяціею найти лучеиспусканіе чернаго тѣла. Эти и подобныя имъ изслѣдованія имѣютъ теперь лишь историческій интересъ, послѣ того, какъ удалось осу-

[1] Окончаніе, см. стр. 21.

ществить черное тѣло и довести опыты съ нимъ до самыхъ высокихъ температуръ.

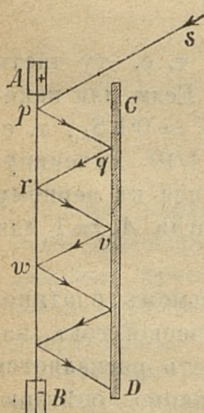
Согласно опредѣленію Кирхгоффа это „идеальное тѣло" не должно ни отражать, ни пропускать волнъ; оно должно поглощать всю падающую на него энергію и превращать ее въ теплоту. Такого тѣла въ природѣ не существуетъ, такъ какъ всякое тѣло болѣе или менѣе отражаетъ лучи. Конечно, нѣкоторыя вещества, какъ сажа или платиновая чернь, очень близки къ кирхгоффскому требованію, такъ какъ они почти не отражаютъ свѣтящихъ лучей (потому-то мы и называемъ ихъ черными) и очень хорошо поглощаютъ инфракрасные лучи. Эти вещества имѣютъ только тотъ недостатокъ, что не переносятъ высокихъ температуръ, ибо сажа сгораетъ при 400°Ц. а платиновая чернь обращается въ обыкновенную платину при 600°. Чистая же платина, какъ и прочіе благородные металлы, далеко не такъ лучеиспускаетъ, какъ черное тѣло. Для улучшенія лучеиспусканія этихъ металловъ ихъ покрываютъ такими веществами (окисью мѣди, урана и т. д.), которыя слабо отражаютъ и потому сильно излучаютъ, ибо для всѣхъ непрозрачныхъ тѣлъ, какъ платина, имѣетъ мѣсто формула

$$A_\lambda = 1 - R_\lambda,$$

гдѣ R_λ означаетъ отражательную способность, т. е. ту часть падающей энергіи, которая отражается тѣломъ. Если для какого-нибудь тѣла $R_\lambda = 0{\cdot}9$, то $A_\lambda = 0{\cdot}1$ и слѣд. $E_\lambda = 0{\cdot}1\,S_\lambda$, т. е. лучеиспусканіе этого тѣла составляетъ лишь 1/10 лучеиспусканія чернаго тѣла. Мы тѣмъ болѣе приблизимся къ черному тѣлу, чѣмъ R_λ будетъ ближе къ нулю, ибо тогда $A_\lambda = 1$ или $E_\lambda = S_\lambda$.

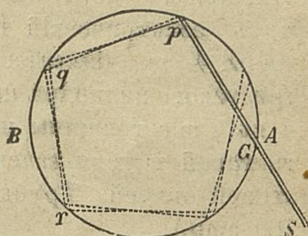
Для иллюстрированія этого слѣдствія возьмемъ платиновую пластинку и, пропуская чрезъ нея электрическій токъ, нагрѣемъ ее до краснаго каленія: вся ея поверхность раскаляется равномѣрно и представляется повсюду одинаково свѣтлою. Прервемъ токъ и на охлажденной пластинкѣ проведемъ чернилами нѣсколько полосъ; если пропустимъ опять токъ, то жидкость испарится и останется слой окиси желѣза; при нагрѣваніи пластинки до каленія мы видимъ, что чернильныя полосы свѣтятъ ярче, чѣмъ чистая платина! Повидимому тутъ противорѣчіе. Въ холодномъ состояніи чернильныя полосы темнѣе платины, а при

накаливаніи онѣ свѣтлѣе, хотя температура всюду одинакова, въ чемъ легко убѣдиться, взглянувъ на заднюю сторону, которая представляется повсюду одинаково яркою. Усиленіе лучеиспусканія обусловливается слѣд. свойствами окиси желѣза, именно ея большею поглощаемостью и меньшею отражательною способностью. Итакъ въ раскаленномъ состояніи тѣло представляется тѣмъ свѣтлѣе, чѣмъ оно болѣе поглощаетъ и чѣмъ „темнѣе“ представляется оно глазу при обыкновенной комнатной температурѣ. Конечно, о лучеиспускательной способности раскаленнаго тѣла можно заключить только по поглощенію его въ томъ же состояніи, слѣд. кирхгоффское „черное тѣло“ или поглощающее тѣло par excellence должно всего ярче свѣтить. Лишь косвеннымъ путемъ можно получить абсолютно поглощающее тѣло, искуственно добившись того, чтобы всѣ падающіе лучи поглощались ($A_\lambda = 1$) и чтобы никакіе лучи не отражались ($R_\lambda = 0$). Рѣшеніе этой задачи сравнительно даже нетрудно: стоитъ лишь озаботиться, чтобы отраженная тѣломъ энергія была ему возвращена, напр. отраженіемъ отъ совершеннаго зеркала. Можно различными средствами лишить тѣло способности отражать лучи, хотя бы по одному направленію. Электрически нагрѣваемую платиновую поверхность AB (фиг. 1) ставятъ противъ зеркала CD (толстаго хорошо отполированнаго серебряннаго зеркала); пучокъ лучей sp отчасти поглощается платиною при p, остальная же часть отражается по направленію pq; при q она вполнѣ отражается въ направленіе qr; часть этихъ лучей опять поглощается платиною въ r, а остальная отражается въ направленіе rv и т. д Понятно, что послѣ достаточнаго числа внутреннихъ отраженій вся энергія, доставляемая платинѣ по направленію sp, будетъ ею поглощена. Этотъ процессъ имѣетъ мѣсто, какъ бы сильно ни была нагрѣта платина, слѣд. согласно закону Кирхгоффа—и обратно: по направленію ps происходитъ наибольшее или „черное“ лучеиспусканіе нагрѣтой пластинки AB. Удобнѣе и проще осуществить черное тѣло слѣдующимъ способомъ. Вообразимъ себѣ полый шаръ ABC (фиг 2) изъ чистой платины съ малымъ отверстіемъ AG; пучокъ лучей, входящій внутрь шара по направленіи Sp, многократно отра-



фиг. 1.

жается въ p, q, r и т. д. и такимъ образомъ вполнѣ поглощается прежде, чѣмъ опять достигнетъ отверстія; такимъ образомъ для лучей направленія Sp зеркальная полость совершенно черная, ибо $A_\lambda = 1$; слѣд. и наоборотъ по направленію Sp изъ полости выходитъ черное лучеиспусканіе именно той температуры, до которой нагрѣта полость. Для мало наклоненныхъ направленій паденія поглощеніе меньше, слѣд и излученіе меньше, чѣмъ излученіе чернаго тѣла. Еще лучше если внутреннюю поверхность полаго шара сдѣлать поглощающею, покрывъ ее окисью желѣза или урана, а для болѣе низкихъ температуръ—сажею или платиновою чернью. Вслѣдствіе разсѣяннаго отраженія отъ этихъ веществъ, отверстіе полости даетъ черное лучеиспусканіе по всѣмъ направленіямъ, какъ если бы оно было покрыто идеально-чернымъ веществомъ!



фиг. 2.

Здѣсь conditio sine qua non состоитъ въ томъ, чтобы платиновый шаръ былъ повсюду нагрѣтъ до одной температуры. Такимъ образомъ если *полый шаръ равномѣрно нагрѣтъ, то его отверстіе даетъ черное лучеиспусканіе, соотвѣтствующее температурѣ шара.*

Такимъ путемъ Винъ и я осуществили черное лучеиспусканіе почти съ тѣмъ совершенствомъ, которое требуетъ теорія. Замѣчательно, что потребовалось почти 40 лѣтъ, чтобы достичь этой цѣли, хотя избранный нами путь былъ еще указанъ самимъ Кирхгоффомъ.

Черное тѣло низкихъ температуръ мы осуществляли при помощи сосуда съ двойнымя стѣнками, промежутокъ между которыми мы наполняли паромъ кипящей воды, льдомъ, твердою углекислотою, жидкимъ воздухомъ и т. п. Внутренность такого сосуда служила лучевымъ пространствомъ и чрезъ трубку сообщалась съ внѣшнимъ воздухомъ. Такимъ образомъ мы получали черное лучеиспусканіе въ предѣлахъ отъ 100° до —180°Ц.

Для достиженія болѣе высокихъ температуръ надо было обратиться къ селитряной банѣ, которою можно пользоваться отъ 230° до 700°Ц. Для еще болѣе высокихъ температуръ надо брать шамотовыя печи, нагрѣваемыя углемъ или газомъ; не говоря о томъ, что такимъ путемъ нельзя итти далѣе 1400°Ц.,

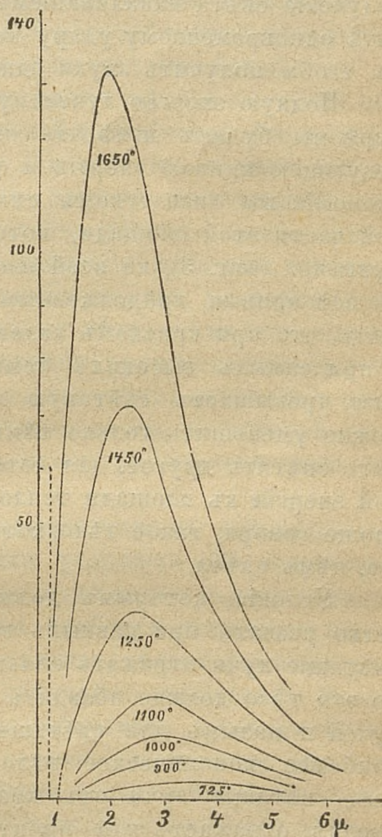
тутъ встрѣчается одно затрудненіе: температуру печи невозможно поддерживать всюду и всегда постоянною.

Это неудобство вполнѣ устраняется въ „электрически накаливаемомъ“ черномъ тѣлѣ. Здѣсь источникомъ нагрѣванія служитъ электрическій токъ. Платиновый цилиндръ (0·01 mm толщины, 4 cm. діаметра и 40 cm. длины) нагрѣвался токомъ; внутри такого цилиндра помѣщалась фарфоровая трубка со стѣнками въ 2 mm толщины и съ перегородкою посрединѣ; внутренность такой трубки зачернялась смѣсью хромо никкелевой и кобальтовой окисей. Трубку можно нагрѣвать до 1520°Ц (токомъ въ 100 amp.).

Такъ какъ платина плавится при 1760°, то для температуръ выше 1500° нагрѣвательную трубку пришлось дѣлать изъ „проводника второго класса“, именно изъ угля; сама трубка служила и чернымъ тѣломъ; при токѣ въ 160 amp., получалась температура въ 2300°Ц.

14. *Распредѣленіе энергіи въ спектрѣ чернаго тѣла.* Съ осуществленіемъ чернаго лучеиспусканія и съ установленіемъ его законовъ былъ сдѣланъ значительный шагъ впередъ относительно всѣхъ другихъ лучеиспусканій, ибо—согласно съ закономъ Кирхгоффа—черное тѣло даетъ максимальное лучеиспусканіе. Лучами каждаго сорта черное тѣло излучаетъ больше, чѣмъ всякое реальное тѣло той же температуры; такимъ образомъ кривая энергіи чернаго тѣла всюду выше такой же кривой другого тѣла. При помощи чисто температурнаго лучеиспусканія не отъ какого источника нельзя получить большей яркости, какъ отъ чернаго тѣла. Вмѣстѣ съ тѣмъ это самый неэкономный источникъ, ибо онъ высылаетъ максимальную энергію въ невидимой части спектра, энергію, которая для глаза является безполезнымъ балластомъ. Экономичнѣе тѣ свѣтящія нечерныя тѣла, которыя избирательно отражаютъ, поглощая свѣтящіе лучи сильнѣе, чѣмъ несвѣтящіе. Для того, чтобы составить себѣ понятіе о томъ, сколько энергіи теряется даромъ при употребленіи чернаго тѣла, въ качествѣ источника свѣта, надо знать какъ при различныхъ температурахъ измѣняется черное лучеиспусканіе отъ одной волны до другой. На фиг. 3 представлены результаты ряда подобныхъ наблюденій, которыя я сдѣлалъ вмѣстѣ съ Прингсгеймомъ для изученія распредѣленія энергіи въ спектрѣ чернаго тѣла въ возможно широкихъ предѣлахъ температуръ. Энергія лучей измѣрялась болометромъ Луммера-Курл-

баума, а спектръ образовывался призмою изъ плавиковаго шпата или сильвина. Наши изслѣдованія простирались отъ—180°Ц. (температура жидкаго воздуха) до 1600°Ц. (температура плавленія фарфора) и въ предѣлахъ волнъ отъ 0·8 μ до 19 μ. Кривыя даютъ понятіе о томъ, какъ измѣняется лучеиспусканіе E *какого-нибудь* тѣла съ длиною волны λ и съ температурою T. Здѣсь абсциссы выражены въ микронахъ ($\mu = 0{\cdot}001$ mm), а соотвѣтствующія ординаты представляютъ лучеиспусканія E. Для полученія энергіи, соотвѣтствующей длинѣ волны λ, надо среднее лучеиспусканіе E_λ, соотвѣтствующее малому промежутку между λ и $\lambda + d\lambda$, помножить на $d\lambda$. Такимъ образомъ наши кривыя (до постояннаго фактора) тождественны съ кривыми энергіи, и слѣдовательно представляютъ также измѣненіе энергіи отъ одной волны до другой.



Фиг. 3.

Видимый спектръ простирается отъ 0·4 μ до 0·8 μ, гдѣ на нашемъ чертежѣ проведена вертикальная пунктирная прямая; правѣе ея лежитъ та энергія, которую мы не воспринимаемъ, какъ свѣтъ, лѣвѣе—свѣтовая энергія. Послѣдняя такъ мала, что, не смотря на самые чувствительные болометры, мы едва были въ состояніи прослѣдить ее лишь для самыхъ высокихъ температуръ. Такъ какъ энергія обращается въ нуль вмѣстѣ съ длиною волны, то всѣ наши кривыя проходятъ чрезъ начало координатъ. Вѣтви кривыхъ между 0·4 и 0·8 μ соотвѣтствуютъ свѣтящимъ лучамъ. Отсюда такое заключеніе: тамъ, гдѣ нашъ глазъ почти ослѣпленъ, физика едва можетъ измѣрить доставляемую энергію, ибо наибольшая часть энергіи доставляется тѣми волнами, которыя не ощущаются

глазомъ. Какая страшная потеря энергіи! Какъ невыгодно употреблять черное тѣло въ качествѣ источника свѣта!

Если сравнить эѳирныя волны съ звуками фортепіано, то полученіе свѣта накаливаніемъ чернаго тѣла слѣдуетъ уподобить одновременному удару по всѣмъ клавишамъ для того только, чтобы получить звуки одной верхней октавы!

Полную энергію лучеиспусканія при какой-нибудь температурѣ мы будемъ измѣрять площадью, ограниченною соотвѣтствующею кривою энергіи и осью абсциссъ; послѣ этого мѣрою экономіи въ физическомъ смыслѣ будетъ служить отношеніе той части этой площади, которая лежитъ лѣвѣе вертикальнаго пунктира (фиг. 3), ко всей площади. Если мы представимъ себѣ всѣ кривыя, продолженными до начала координатъ, то увидимъ, что при красномъ каленіи тепловая энергія въ 1000 разъ, а при самыхъ высокихъ температурахъ все-таки еще въ 100 разъ превышаетъ свѣтовую энергію. Эту громадную потерю можно уменьшить только тѣмъ, что вмѣсто чернаго тѣла заставить свѣтить другое, для котораго отношеніе площади свѣтовой энергіи къ площади тепловой энергіи было бы больше, или, проще говоря, такое тѣло, которое бы лучеиспускало тепла меньше, чѣмъ свѣта.

Условія, которымъ должно удовлетворять искомое тѣло, легко указать: при равныхъ температурахъ, это тѣло должно несвѣтящіе лучи отражать сильнѣе, чѣмъ свѣтящіе; слѣдовательно это тѣло должно обладать большимъ R_λ для несвѣтящихъ лучей и малымъ для свѣтящихъ; слѣдовательно, ceteris paribus, наиболѣе экономическое тѣло то, которое вполнѣ поглощаетъ всѣ свѣтящіе лучи отъ краснаго до фіолетоваго ($A_\lambda = 1$) и вполнѣ отражаетъ или пропускаетъ всѣ другіе лучи. Такое воображаемое тѣло было бы нормальнымъ источникомъ свѣта.

Теперь мы можемъ такъ формулировать первую задачу освѣтительной техники: *найти свѣтящее вещество, которое бы испускало только свѣтящіе лучи и не испускало несвѣтящихъ*, иными словами, *найти тѣло, поглощающее всѣ свѣтящіе лучи и вполнѣ отражающее всѣ несвѣтящіе лучи.*

Излученіе такого идеальнаго источника свѣта можно уподобить игрѣ на фортепіано, когда ударяютъ лишь тѣ струны, звуки которыхъ хотятъ извлечь.

Существуютъ-ли такія вещества, абсолютно-черныя для видимаго спектра и абсолютно-отражающія для невидимыхъ

частей спектра? Какъ бы то ни было, но такое вещество потребляло бы при красномъ каленіи въ 1000 разъ, а при бѣломъ каленіи въ 100 разъ меньше энергіи, чѣмъ черное тѣло при тѣхъ же температурахъ. Тотъ, кому удастся найти идеальный источникъ свѣта, сразу вытѣснитъ всѣ употребляемые донынѣ источники, обезсмертитъ свое имя и наживетъ милліоны!

Въ какой мѣрѣ освѣтительная сила ауэровскаго чулка обязана своей избирательной отражающей способности, это вопросъ, который пока еще не рѣшенъ. Во всякомъ случаѣ ауэровскій матеріалъ, какъ и матеріалъ другихъ источниковъ свѣта, еще очень далекъ отъ того, чтобы свѣтить, какъ идеальный источникъ свѣта. Всѣ наши свѣтящія вещества, включая сюда „нернстовское вещество" и осміевую нить, по своему лучеиспусканію, гораздо ближе къ черному тѣлу, чѣмъ къ „идеальному". Успѣхи освѣтительной техники преимущественно обязаны повышенію температуры источника свѣта; исключеніе представляетъ новѣйшая „цвѣтная" дуговая лампа, въ которой отчасти свѣтятъ и раскаленные пары, и потому играетъ роль луминесценція.

Пары и газы скорѣе уподобляются нашимъ музыкальнымъ инструментамъ, ибо при извѣстныхъ условіяхъ они испускаютъ не всѣ волны одновременно, а лишь отдѣльныя волны, соотвѣтствующія ихъ веществу. На этомъ свойствѣ свѣтящихъ газовъ и паровъ основанъ спектральный анализъ, въ которомъ по роду спектра заключаютъ о природѣ свѣтящаго вещества. Только когда мы сумѣемъ заставить газы испускать лучи сообразно нашему желанію, освѣтительная техника достигнетъ надлежащей высоты и сравняется въ экономіи со свѣченіемъ жучка. Этой цѣли можно достичь только изученіемъ механики электрона, этого атома электричества, носителя зарядовъ въ катодныхъ и беккерелевскихъ лучахъ, и колебаніями котораго обусловливается свѣченіе матеріальныхъ тѣлъ. Электроны въ парообразныхъ веществахъ можно уподобить клавишамъ нашихъ фортепіанъ, которыя можно ударять отдѣльно, не вызывая вмѣстѣ съ тѣмъ другихъ звуковъ!

15. *Законы лучеиспусканія чистой платины.* Для сравненія достоинствъ разныхъ источниковъ свѣта съ достоинствомъ чернаго тѣла и сужденія о томъ, насколько свѣтящія въ нихъ вещества приближаются къ идеальному излучателю, надо кромѣ ихъ кривой энергіи знать еще ихъ температуру. До самаго послѣдня-

го времени эта задача была неразрѣшима. Всѣ эти вопросы разрѣшаются сравнительно легко, если кромѣ чернаго тѣла изслѣдуемъ еще чистую платину и черному лучеиспусканію противопоставимъ лучеиспусканіе чистой платины. Такимъ образомъ кромѣ максимальнаго закона мы получаемъ минимальный законъ, ибо, благодаря своей большой отражательной способности, чистая платина поглощаетъ меньше, чѣмъ какое-нибудь твердое и угнеупорное тѣло, такъ что ея лучеиспусканіе сводится къ minimum. Дѣйствительно при красномъ каленіи чистая платина не излучаетъ и 1/10 части, а при самыхъ высокихъ температурахъ все-таки меньше половины той энергіи, которую при тѣхъ же условіяхъ излучаетъ черное тѣло. Даже въ расплавленномъ состояніи платина отражаетъ также, какъ зеркало.

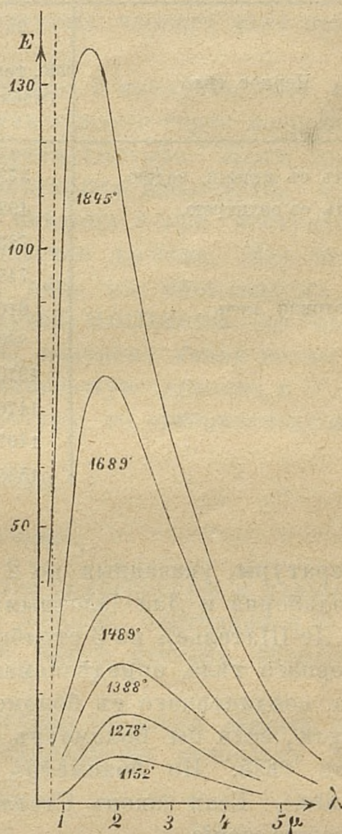
Въ виду этого при изученіи лучеиспусканія чистой платины надо обращать вниманіе на то, чтобы къ лучамъ платины не примѣшивались еще посторонніе лучи, которые отражаются отъ ея поверхности. Поэтому же исключается возможность нагрѣвать платину внутри печи, ибо тогда платина — благодаря своей, отражательной способности — посылала бы наружу и тѣ лучи которые испускаетъ печь. При нагрѣваніи пламенемъ трудно достичь однородной температуры по всей излучающей поверхности, да и точно опредѣлить температуру ея было бы очень трудно. Даже при электрическомъ накаливаніи платины опредѣленіе температуры при помощи термоэлемента небезупречно.

Въ виду всего сказаннаго изъ платиновой пластики приготовлялась закрытая со всѣхъ сторонъ коробка, внутрь которой вводился (изолированный) термоэлементъ; изслѣдовалось лучеиспусканіе наружной поверхности такой коробки, нагрѣваемой электрическимъ токомъ.

Противопоставить максимальному излучателю (т. е. черному тѣлу) минимальный излучатель (т. е. чистую платину) и изслѣдовать законы лучеиспусканія этихъ двухъ тѣлъ было безспорно счастливою мыслью, которая принесла большую практическую пользу. Ибо въ то время, какъ оба эти тѣла легко доступны изслѣдованію и опредѣленіе ихъ температуры не представляетъ затрудненія, того же нельзя сказать относительно употребительныхъ свѣтящихъ тѣлъ; съ другой стороны можно съ увѣренностью утверждать, что большинство изъ нихъ, какъ напр. уголь, въ отношеніи отражательной и испускательной спо-

собностей, заключены въ предѣлахъ между чернымъ тѣломъ и чистою платиною.

На фиг. 4 представлены прежнимъ способомъ результаты опытовъ съ лучеиспусканіемъ чистой платины. Изъ формы этой кривой слѣдуетъ, что и въ случаѣ платины даже при самыхъ высокихъ температурахъ бо́льшая часть площади, представляющей энергію, опять-таки приходится на тепловую энергію. Вертикальная линія, отдѣляющая, свѣтовую энергію отъ тепловой, показываетъ, что платина представляетъ столь же малую экономію, какъ черное тѣло или всякій другой источникъ свѣта, въ которыхъ свѣтящія вещества принадлежатъ къ классу „платина—черное тѣло": въ нихъ происходитъ такая же громадная потеря энергіи.



фиг. 4.

16. *Законъ Сте́фана-Больцмана.* Въ 1879 г. Сте́фанъ—на основаніи прежнихъ наблюденій—формулировалъ названный по его имени законъ, состоящій въ томъ, что *полное лучеиспусканіе тѣла пропорціонально четвертой степени его абсолютной температуры;* самъ Сте́фанъ думалъ, что его законъ совершенно общій; но Больцманъ теоретически доказалъ, что онъ относится только къ кирхгоффскому черному тѣлу; опыты вполнѣ подтвердили это. Далѣе опыты показали, что полное лучеиспусканіе чистой платины пропорціонально пятой степени ея абсолютной температуры, а лучеиспусканіе такихъ тѣлъ, какъ окись желѣза, уголь и т. п., пропорціонально промежуточной степени температуры.

Насколько точенъ законъ Сте́фана-Больцмана, объ этомъ можно судить по таблицѣ 1, представляющей на основаніи опы-

товъ Прингсгейма и моихъ—зависимость полнаго лучеиспусканія чернаго тѣла отъ температуры.

ТАБЛИЦА I.

1 Черное тѣло	2 абс. темп. (набл.)	3 отклоненіе	4 10^{10} C	5 абс. темп. (выч.)	6 Разница темпер. наблюд.
Сосудъ съ кипящ. водою. . .	373·1	156	127	374·6	—1·5
Котелъ съ селитрою.	492·5	638	124	492·0	+0·5
„	723	3320	124·8	724·3	—1·3
„	745	3810	125·6	749·1	—4·1
Шамотовая печь	810	5150	121·6	806·5	+3·5
„	868	6910	123·3	867·1	+0·9
„	1378	44750	124·2	1379	—1
„	1470	57400	123·1	1468	+2
„	1497	60600	120·9	1488	+9
„	1535	67800	122·3	1531	+4
			Среднее 123·8		

Температуры, указанныя во 2 столбцѣ, опредѣлялись по способу Гольборна и Дая (азотнымъ термометромъ и термоэлементомъ Ле-Шателье); въ 3 столбцѣ показана полная лучистая энергія чернаго тѣла, опредѣляемая отклоненіемъ стрѣлки гальванометра, соединеннаго съ болометромъ. Это отклоненіе равнялось бы нулю, если бы болометръ имѣлъ ту же температуру, какъ черное тѣло. Но болометръ былъ всегда нагрѣтъ до 17°Ц. (290° abs.). Если законъ Стефана вѣренъ, то должно имѣть мѣсто соотношеніе

$$A = C(T^4 - 290^4),$$

гдѣ A—отклоненіе стрѣлки гальванометра, T абсолютная температура чернаго тѣла и C постоянная. Въ 4 столбцѣ показаны значенія этой постоянной, вычисленной по пред. формулѣ для разныхъ температуръ. Близость между собою этихъ чиселъ всего лучше доказываетъ справедливость закона Стефана. Пользуясь среднимъ значеніемъ C, можно для каждаго A вычис-

лить T—абсолютную температуру чернаго тѣла; результаты подобныхъ вычисленій приведены въ 5 столбцѣ.

Законъ Стéфана можно выразить такою формулою:

$$S_T = \sigma T^4, \qquad 1)$$

гдѣ S_T означаетъ полное лучеиспусканіе чернаго тѣла при температурѣ T и σ—постоянная.

17. *Наибольшая энергія.* Изъ фиг. 3 слѣдуетъ, что съ повышеніемъ температуры энергія луча каждаго сорта возростаетъ, но для малыхъ волнъ она возростаетъ быстрѣе. Наши измѣренія подтверждаютъ результатъ извѣстныхъ наблюденій, что тѣло начинаетъ свѣтить краснымъ свѣтомъ и при постепенномъ повышеніи температуры оно накаляется до-бѣла. Изъ нашихъ кривыхъ можно еще заключить, какъ съ повышеніемъ температуры наибольшая энергія лучей измѣняется—по величинѣ и по положенію. Если чрезъ λ_m назовемъ длину волны луча наибольшей яркости, E_m—эту наибольшую яркость и T соотвѣтствующую абсолютную температуру, то оказывается именно, что

$$\lambda_m T = \text{const.} \qquad 2)$$

и

$$E_m T^{-5} = \text{const.}, \qquad 3)$$

т. е. 1) произведеніе изъ абсолютной температуры и длины волны, соотвѣтствующей наибольшей энергіи, постоянно и 2) наибольшая энергія пропорціональна пятой степени абсолютной температуры.

Въ слѣдующей таблицѣ приведены числовыя данныя, получаемыя изъ нашихъ кривыхъ и показывающія насколько точны указанные законы.

ТАБЛИЦА II.

T	λ_m	E_m	$\lambda_m T$	$E_m T^{-5}$
1646	1·78	270·6	2928	2246
1460·4	2·04	145·0	2979	2184
1259	2·35	68·8	2959	2176
1094	2·71	34·0	2966	2164
998·5	2·96	21·50	2956	2166
908·5	3·28	13·66	2980	2208
723	4·08	4·28	2950	2166
621·3	4·53	2·03	2814	2190
		Среднее	2940	2188

Законы, выраженные формулами 1), 2) и 3), чрезвычайно просты (послѣднiе два выводятся и теоретически) и такимъ образомъ вполнѣ подтверждаютъ вышеупомянутое пророчество Кирхгоффа. Кромѣ того эти законы позволяютъ шкалу газоваго термометра замѣнить „энергетическою" шкалою, о чемъ подробнѣе будетъ сказано ниже.

Для разъясненiя содержанiя нашихъ законовъ приведемъ одинъ числовой примѣръ. Пусть абсолютная температура чернаго тѣла возростаетъ отъ 1000^{0} до 2000^{0}, т. е. въ отношенiи $1:2$; тогда полное лучеиспусканiе измѣняется въ отношенiи $(1:2)^{4}=1:16$; а максимальная энергiя въ отношенiи $(1:2)^{5}=1:32$, при чемъ maximum энергiи перемѣщается изъ $\lambda_{m}=2940/1000=2{\cdot}94\mu$ въ $\lambda_{m}=2940/2000=1{\cdot}47\mu$. Такимъ образомъ съ повышенiемъ температуры тѣла maximum энергiи его лучей перемѣщается къ меньшимъ волнамъ; при 5880^{0} abs. онъ находится въ $\lambda=0{\cdot}5\mu$, т. е. въ желто-зеленой части видимаго спектра, лучи которой соотвѣтствуютъ наибольшей чувствительности нашего глаза.

18. *Спектральное уравненiе.* Наконецъ кривыя наши представляютъ всѣ данныя для вывода спектральнаго уравненiя, опредѣляющаго, какъ при данной температурѣ измѣняется энергiя луча отъ одного сорта къ другому. Основываясь на нашихъ опытахъ, Планкъ далъ спектральному уравненiю такую форму:

$$S=\frac{C\lambda^{-5}}{e^{c/\lambda T}-1}, \tag{4}$$

гдѣ S—лучистая энергiя чернаго тѣла температуры T, соотвѣтствующая длинѣ волны λ, e—основанiе неперовыхъ логариѳмовъ, c и C постоянныя. Въ этомъ ур-iи заключаются и тѣ частные законы, которые выражаются формулами 1), 2) и 3). Хотя эта формула можетъ быть и не представляетъ еще „закона природы", но она настолько точно выражаетъ зависимость кирхгоффской постоянной отъ температуры и длины волны, что вполнѣ разрѣшаетъ рядъ важныхъ научныхъ и техническихъ вопросовъ.

19. *Опредѣленiе температуры употребительныхъ источниковъ свѣта и солнца.* Каждое изъ ур-iй (1), 2) и 3) можетъ служить, для опредѣленiя температуры чернаго тѣла по его излу-

нію. Всего проще это сдѣлать при помощи ур-ія (2), которое (см. табл. II) можемъ представить

$$\lambda_m T = 2940; \tag{5}$$

такъ какъ maximum сохраняетъ свое мѣсто въ спектрѣ, если энергію всѣхъ волнъ уменьшить равномѣрно, то это ур-іе примѣнимо и къ „сѣрымъ" тѣламъ, которыя одинаково отражаютъ всѣ волны и для которыхъ слѣдовательно кривыя энергіи имѣютъ такую же форму, какъ для чернаго тѣла, но во всѣхъ частяхъ спектра энергія уменьшена на одно и то же число процентовъ.

Предыдущее уравненіе можно примѣнить только въ томъ случаѣ, когда мы увѣрены, что излучающее тѣло „черное" или „сѣрое". Но какъ узнать, что тѣло отражаетъ одинъ и тотъ же процентъ всѣхъ волнъ? Къ счастью этотъ трудный вопросъ можно обойти, если обратимся за помощью къ чистой платинѣ. По нашимъ опытамъ и для нея имѣетъ мѣсто форм. (2), только постоянное имѣетъ иное значеніе, чѣмъ для чернаго тѣла; именно для чистой платины

$$\lambda_m T = 2630 \tag{6}$$

Съ помощью формулъ (5) и (6) легко опредѣлить предѣлы, между которыми лежитъ температура свѣтящаго тѣла, принадлежащаго къ классу „черное тѣло—платина". Если для даннаго свѣтящаго тѣла извѣстно λ_m (т. е. положеніе наибольшей энергіи въ спектрѣ), то $2940/\lambda_m$ даетъ высшій предѣлъ, а $2630/\lambda_m$ — низшій предѣлъ. Въ табл. III приведены вычисленные такимъ образомъ предѣлы температуръ для нѣкоторыхъ источниковъ свѣта.

ТАБЛИЦА III.

	λ_m	T_{max}	T_{min}
Солнце	0·5	5880°	5260
Дуговая лампа. . . .	0·7	4200	3750
Ацетил. пл.	0·98	3000	2700
Лампа Нернста . . .	1 2	2450	2200
Лампа Ауэра	1·2	2450	2200
Калильная лампочка. .	1·4	2100	1875
Свѣча	1·5	1960	1750
Аргандова лампа . . .	1·55	1900	1700

Примѣненіемъ термоэлемента температуру ацетиленоваго пламени оцѣнивали въ 1800°, а для температуры солнца давали цифры въ сотни тысячъ и милліоны градусовъ.

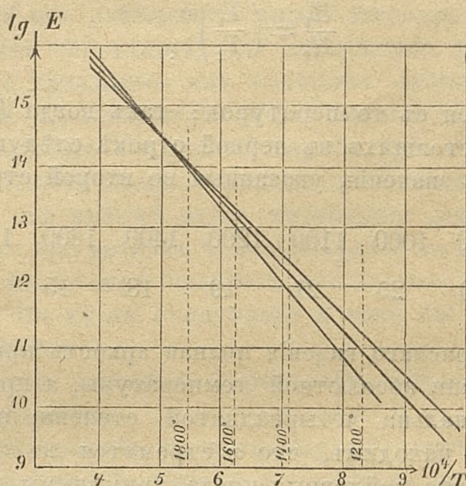
20. *Вторая задача освѣтительной техники.* Выше было выяснено, какъ еще далеко мы находимся отъ главной нашей цѣли—полученія свѣта безъ тепла. Задача о раздѣленіи свѣта и тепла будетъ разрѣшена только тогда, когда будетъ найдено идеальное свѣтящее тѣло. При стремленіи достичь этой цѣли, надо имѣть въ виду еще другую цѣль, значеніе которой можно оцѣнить, изслѣдовавъ зависимость яркости отъ температуры.

a) *Возростаніе яркости отдѣльныхъ сортовъ лучей съ температурою.* Мы уже знаемъ, что полное лучеиспусканіе возростаетъ пропорціонально четвертой, а наибольшая ярость—даже пятой степени абсолютной температуры. Ниже мы увидимъ, что яркость свѣтящихъ лучей еще быстрѣе возростаетъ съ температурою.

Для опредѣленія зависимости яркости отъ температуры можно, пользуясь спектральнымъ уравненіемъ чернаго тѣла, вычислить энергію каждой волны видимаго спектра для различныхъ температуръ. Или же можно спектрофотометромъ прямо измѣрить яркость лучей опредѣленнаго сорта для нѣкоторыхъ температуръ чернаго тѣла и построить кривую. На основаніи этихъ измѣреній можно построить такъ называемыя *изохроматическія линіи*, которыя принимаютъ особенно простую форму, если за абсциссы взять $1/T$, а за ординаты $\log E$; тогда это прямыя линіи. На фиг. 5 изображены три изохроматическія линіи, изъ коихъ наиболѣе полагая соотвѣтствуетъ $\lambda = 0{\cdot}64$, средняя — $0{\cdot}59$ и наиболѣе наклонная—$0{\cdot}50\,\mu$. Изъ крутого наклона этихъ линій слѣдуетъ, что *яркость лучей очень быстро возростаетъ съ температурою*; такъ напр. изъ нашего чертежа видно, что яркость желтыхъ лучей удвоивается, когда температура чернаго тѣла повышается съ 1800° до 1875°, т. е. когда она увеличивается лишь на 4%; еще быстрѣе возростаетъ яркость въ синей части спектра; наоборотъ въ красной части, яркость лучей возростаетъ медленнѣе.

b) *Спектро-фотометрическое опредѣленіе температуры.* Изохроматическія линіи могутъ служить для очень точнаго опредѣленія температуры источника свѣта. Стоитъ только измѣрить яркость одного изъ лучей испытуемаго источника, для которыхъ составленъ чертежъ 5, взять log этой яркости, принять ее за ординату соотвѣтствующей изохроматической линіи и изъ соот-

вѣтствующей абсциссы найти температуру. Этотъ спектрофотометрическій способъ опредѣленія температуры отличается отъ вышеуказанныхъ тѣмъ, что примѣняется и къ тѣламъ, столь отличающимся отъ чернаго тѣла, какъ чистая платина. Мы опре-



фиг. 5.

дѣлили температуру платины одновременно изъ изохроматическихъ линій и при помощи термоэлемента; разницы получились незначительныя—около 40° при температурѣ въ 1000° abs. и нѣсколько больше 100° при 1800°. Для другихъ особенно важныхъ тѣлъ, какъ напр. для угля, ошибки еще меньше, вслѣдствіе чрезвычайно быстраго возростанія яркости съ температурою. Поэтому не требуется и особенной точности фотометрическаго измѣренія; ошибка наблюденія въ 10% влечетъ за собою ошибку въ 10° при опредѣленіи температуры до-бѣла раскаленной платины. Описанный методъ служитъ основаніемъ для новаго *оптическаго термометра*, который однимъ отсчетомъ позволяетъ опредѣлять температуру пламени, печи и т. д. съ ошибкою около 100°.

c) *Зависимость полной яркости отъ температуры.* Кромѣ измѣреній въ разныхъ частяхъ спектра имѣются фотометрическія наблюденія, которыя опредѣляютъ возростаніе полной энергіи, воспринимаемой, какъ свѣтъ. Эти измѣренія показали, что полная яркость платины или чернаго тѣла еще быстрѣе возростаетъ съ температурою, чѣмъ maximum яркости.

Приведемъ результаты опытовъ съ платиною. Если чрезъ T_1 и T_2 обозначимъ двѣ очень близкія температуры свѣтящаго тѣла и чрезъ H_1 и H_2 соотвѣтствующія яркости, то

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^x,$$

гдѣ x измѣняется съ температурою; такъ когда T_1 и T_2 взяты вблизи чиселъ, стоящихъ въ первой строкѣ слѣдующей таблички, то x имѣетъ значенія, указанныя во второй строкѣ:

T	900	1000	1100	1200	1400	1600	1900
x	30	25	21	19	18	15	14

Итакъ вблизи краснаго каленія полная яркость пропорціональна тридцатой степени абсолютной температуры, а при бѣломъ каленіи пропорціональна четырнадцатой степени; экстраполируя эти результаты, находимъ, что x стремится къ предѣлу $= 12$. Можно думать, что найденныя числа примѣнимы и къ другимъ источникамъ свѣта.

Если температуру свѣтящаго тѣла повысить съ 2000° до 4000°, т. е. измѣнить въ отношеніи 1/2, то его яркость измѣнится по крайней мѣрѣ въ отношеніи $(1/2)^{12}$ или 1/4000. Въ дуговой лампѣ угли имѣютъ температуру около 4000°, а въ калильной лампочкѣ около 2000°; по нашему закону дуговая лампа даетъ (съ каждой единицы площади) въ 4000 раза больше свѣта, чѣмъ калильная лампочка. Солнце, температуру котораго можно принять въ 6000°, даетъ въ 3^{12} или въ 600000 разъ больше свѣта, чѣмъ калильная лампочка.

21. *Лучистая шкала температуръ.* До сихъ поръ въ наукѣ употреблялись способы опредѣленія температуры, основанные на расширеніи газовъ. Но при высокихъ температурахъ пользованіе газовымъ термометромъ очень затруднительно и до сихъ поръ имъ не удалось точно опредѣлять температуры выше 1150° Ц. Другіе способы, напр. термоэлектрическій, хотя и примѣнимъ къ болѣе высокимъ температурамъ, но могутъ быть связаны съ показаніями газовыхъ термометровъ лишь при помощи эмпирическихъ формулъ, выведенныхъ экстраполяціею. Такимъ образомъ до сихъ поръ не доставало удобнаго способа

опредѣленія высокихъ температуръ, который можно было бы свести къ показаніямъ газоваго термометра.

Съ осуществленіемъ чернаго лучеиспусканія и съ установленіемъ его законовъ открылся новый путь къ достиженію этой цѣли. Каждый изъ указанныхъ выше законовъ лучеиспусканія можетъ служить основаніемъ для опредѣленія температуръ, конечно, въ тѣхъ предѣлахъ, для которыхъ этотъ законъ провѣренъ опытами. Простираются-ли эти законы за тѣ предѣлы, до которыхъ примѣнимъ воздушный термометръ, это очень важный вопросъ, на который прямо отвѣтить пока невозможно. Если же принять, что мы имѣемъ здѣсь настоящіе „законы природы" имѣющіе мѣсто при всякихъ температурахъ, то для температуры чернаго тѣла мы должны получать всегда одно значеніе, какимъ бы способомъ мы ее ни опредѣляли и какъ бы высока эта температура ни была.

Въ основаніи способовъ опредѣленія абсолютной температуры можно положить:

1) Законъ Стéфана, по которому абсолютная температура равна корню четвертой степени изъ полнаго лучеиспусканія.

2) Законъ Вина, по которому абсолютная температура равна корню пятой степени изъ наибольшей энергіи въ спектрѣ.

3) Фотометрическій законъ, который позволяетъ сдѣлать заключеніе о температурѣ чернаго тѣла по яркости лучей опредѣленнаго сорта.

Угольное тѣло, дававшее черное лучеиспусканіе, послѣдовательно ставилось передъ поверхностнымъ болометромъ, спектро-болометромъ и спектро-фотометромъ (градуированными при помощи чернаго тѣла извѣстной температуры), которыми и опредѣлялось его лучеиспусканіе.

Результаты этихъ измѣреній приведены въ слѣдующей табличкѣ

Способъ	Абс. Темп.	90 cm	60 cm	0·62μ	0 59μ	0·55μ	0·51μ	0·49μ
Яркость	2310	—	—	2294	2315	2309	2312	2320
Полное лучеиспусканіе.	2325	2317	2335	—	—	—	—	—
Яркость	2320	—	—	2307	2307	2315	2331	2339
Полное лучеиспусканіе.	2330	2330	2330	—	—	—	—	—
Наибольшая энергія . .	2330	—	—	—	—	—	—	—
Яркость	2330	—	—	2325	2327	2325	2339	2333
Полное лучеиспусканіе.	2345	2348	2339	—	—	—	—	—
Наибольшая энергія . .	2320	—	—	—	—	—	—	—

Температуры, определенныя спектрофотометрически, указаны въ 1, 3 и 6 строкахъ; это среднія изъ нѣсколькихъ опредѣленій для различныхъ длинъ волнъ. Строки 2, 4 и 7 содержатъ температуры, опредѣленныя поверхностнымъ болометромъ; эти числа среднія изъ двухъ, полученныхъ въ разстояніяхъ 90 и 60 cm. Строки 5 и 8 даютъ температуры, полученныя изъ напряженія наибольшей энергіи.

Согласіе результатовъ, полученныхъ различными способами такъ велико, что примѣнимость самыхъ способовъ до 2300° тѣмъ самымъ вполнѣ доказана; такимъ образомъ предѣлъ точнаго опредѣленія температуры отодвинутъ на 1000°!

Если мы пойдемъ дальше и опредѣлимъ абсолютную температуру чернымъ лучеиспусканіемъ, напр. какъ нѣкоторую функцію полнаго лучеиспусканія, то получимъ новую абсолютную шкалу температуръ, которую можно назвать *лучистою шкалою*. Если выберемъ за такую функцію корень четвертой степени изъ полнаго лучеиспусканія и кромѣ того условимся, что разность температуръ кипѣнія и замерзанія воды равна 100°, то показанія по такой шкалы будутъ совпадать съ показаніями по газовой шкалѣ.

22. *Физическая цѣнность различныхъ источниковъ свѣта.* Числа, показывающія возростаніе яркости съ температурою, краснорѣчиво говорятъ, что, преслѣдуя первую цѣль освѣтительной техники—найти идеальное свѣтящее тѣло, мы въ то же время не должны упускать изъ вида и второй цѣли—найти такое идеальное свѣтящее тѣло, которое можно было бы нагрѣвать до возможно высокой температуры и которое бы при этомъ не разрушалось. Посмотримъ теперь насколько близки къ этимъ обѣимъ цѣлямъ употребительные источники свѣта.

Обыкновенные источники свѣта—свѣча, газовое пламя, ацетиленовое пламя и т. д.—по способу ихъ происхожденія можно разсматривать, какъ данныя величины, ибо въ нихъ свѣтятъ мельчайшія частицы угля, принимающія лишь ту температуру, которая возникаетъ при сгораніи соотвѣтствующаго углеводорода. Въ случаѣ свѣчи, керосиноваго пламени и газового рожка эта температура сравнительно низка, а такъ какъ по своимъ свойствамъ уголь близокъ къ абсолютно-черному тѣлу, то эти пламена свѣтятъ очень неэкономно и занимаютъ послѣднее мѣсто въ экономическомъ ряду. Конечно, смотря по устройству

горѣлки, температура пламени, а потому и его экономичность можетъ быть различна.

На первый взглядъ кажется страннымъ, что ацетиленовое пламя, температура котораго около 3000°, занимаетъ то же мѣсто, какъ и обыкновенное газовое пламя съ температурою въ 2000°. Такъ какъ въ томъ и въ другомъ пламени свѣтятъ мельчайшія кусочки угля, то слѣдовало бы ожидать, что ацетиленовое пламя въ $(3000/2000)^{12}$ или въ 130 разъ ярче газоваго. Однако въ дѣйствительности ацетиленовое пламя свѣтитъ не такъ ярко, и причину тому слѣдуетъ искать въ плотности свѣтящаго пламени и другихъ обстоятельствахъ, которыя еще недостаточно выяснены.

Въ калильныхъ и имъ подобныхъ лампочкахъ мы нѣсколько свободнѣе, ибо при данной температурѣ несвѣтящаго пламени, мы можемъ выбирать свѣтящее вещество, которое въ немъ накаливается. Несмотря на это, наиболѣе экономическій изъ подобныхъ источниковъ тотъ, въ которомъ, какъ въ „свѣтѣ Кнёфлера“ (мѣлъ въ несвѣтящемъ пламени ацетилена), достигается наиболѣе высокая температура. Конечно и здѣсь свѣтовой эффектъ существенно зависитъ отъ природы свѣтящаго вещества, а также отъ того, нагрѣвается-ли оно до температуры пламени. Послѣднему требованію удовлетворяетъ, кажется, одинъ только ауэровскій чулокъ, и еслибы удалось его сдѣлать изъ болѣе идеальнаго вещества, то мы бы достигли еще большей экономіи.

Электрическія калильныя лампочки—обыкновенная, нернстовская и осміевая, несмотря на ихъ высокую температуру, не могутъ конкурировать съ газокалильными вслѣдствіе дороговизны электрическаго тока. И ихъ экономія во много разъ возростетъ, когда накаливаемое въ нихъ вещество будетъ замѣнено болѣе идеальнымъ. Но, пока такое еще не найдено, слѣдуетъ приближаться ко второй цѣли и искать такія вещества, которыя бы можно было сильнѣе нагрѣвать токомъ. Чего можно достичь однимъ повышеніемъ температуры я покажу вамъ на опытѣ съ обыкновенною калильною лампочкою.

Здѣсь 45-вольтовая лампочка въ 16 свѣчей; выключая сопротивленія, я могу напряженіе на концахъ лампочки мало-по-малу увеличить до 110 volt. При нормальныхъ условіяхъ чрезъ лампочку долженъ проходить токъ въ 1·3 amp.; тогда она потребляетъ $45 . 1{\cdot}3 = 58{\cdot}5$ wt и даетъ 16 свѣчей. Теперь я постепенно уменьшаю балластное сопротивленіе до 95 volt и 3 amp.

Лампочка горитъ поразительно ярко, поглощая 3·95=285 wt, т. е. въ пять разъ больше энергіи, чѣмъ при нормальныхъ условіяхъ.

Для оцѣнки яркости перекаленной лампочки слѣдовало бы обратиться къ фотометру. Но мы это сдѣлаемъ иначе, допуская, что чрезъ лампочку проходитъ предѣльный токъ, при которомъ ея уголекъ перегораетъ, что—по измѣреніямъ Гольборна и Курлбаума—бываетъ при 3000° abs. Наши измѣренія показали, что при нормальныхъ условіяхъ уголекъ имѣетъ 2000°; такъ какъ яркость пропорціональна 12-ой степени температуры, то въ моментъ перегаранія уголька лампочка должна давать въ $(3/2)^{12}$ или въ 130 разъ больше свѣта, чѣмъ при нормальныхъ условіяхъ, а именно 130.16 = 2080 свѣчей. Итакъ затрачиваемая энергія увеличалась въ 5 разъ, а яркость въ 130 разъ; слѣдовательно экономія увеличена въ 130/5 = 26 разъ; если при нормальныхъ условіяхъ одна свѣча стоитъ 3·5 wt., то теперь она стоитъ лишь 3·5/26 = 0·16 wt или 0·0065 лошадиныхъ силъ. Теперь наша лампа даетъ самый дешевый свѣтъ! Но эта экономія и ненормальная дешевизна дорого оплачиваются, ибо при такихъ условіяхъ лампочка очень недолговѣчна и уголекъ ея скоро перегораетъ. Впрочемъ если такой способъ увеличенія экономіи и не имѣетъ практическаго значенія, нашъ опытъ все-таки очень поучителенъ; онъ ясно показываетъ, что выгоднѣе употреблять три перекаленныхъ лампочки, по 300 часовъ горѣнія каждая, чѣмъ одну нормально горящую лампочку съ 1000 часами горѣнія. Въ практикѣ воспользовались указаніями этого опыта и лампочки для 100 volt. употребляютъ съ напряженіемъ въ 110 volt.

Что касается нернстовской лампочки, то я полагаю, что ея бо́льшая экономія зависитъ главнымъ образомъ отъ болѣе высокой температуры, и только затѣмъ отъ лучшихъ лучеиспускательныхъ свойствъ свѣтящаго вещества; относя послѣднее къ классу „черное тѣло—платина“ и принимая его температуру въ 2300°, находимъ, что яркость нернстовской лампочки должна быть въ $(2300/2000)^{10}$, т. е. въ 4 раза больше яркости обыкновенной калильной лампочки. Такъ какъ въ дѣйствительности ея яркость только въ два раза больше, то мы должны заключить, что условія каленія въ нернстовской лампочкѣ хуже, чѣмъ тонкаго уголька въ пустотѣ.

Судя по цвѣту осміевого свѣта, слѣдуетъ заключить о болѣе высокой температурѣ свѣтящаго вещества, чѣмъ уголька

обыкновенной калильной лампочки. Температура эта еще не опредѣлена.

Наиболѣе высокую температуру, мы получаемъ въ дуговой лампѣ; она опредѣляется испареніемъ угля. Эта страшная температура въ 4000° abs. и есть причина тому, что, несмотря на большую потерю энергіи при производствѣ электрическаго нагрѣванія, свѣтъ дуговой лампы занимаетъ первое мѣсто въ экономическомъ ряду. Будетъ-ли когда-нибудь уголь замѣненъ болѣе идеальнымъ излучающимъ тѣламъ, это покажетъ будущее.

Какъ я уже упомянулъ, недавно былъ сдѣланъ—хотя и по иному пути—первый шагъ для увеличенія эффекта и экономіи дуговой лампы. Введеніемъ соотвѣтствующихъ солей въ пламенную дугу удалось достичь техническаго успѣха въ томъ смыслѣ, что заставили свѣтить болѣе идеальное вещество. Пары этихъ солей (фтористаго кальція, литія, стронція и др.), нагрѣтые до страшной температуры, даютъ спектръ не непрерывный, но состоящій изъ отдѣльныхъ свѣтлыхъ полосокъ; иначе говоря, они испускаютъ преимущественно цвѣтные лучи. Слѣдовательно здѣсь мы приближаемся къ свѣченію гейслеровскихъ трубокъ, въ которыхъ разрѣженные пары и газы возбуждаются къ свѣченію электролуминесценціею. Такимъ образомъ эти новыя лампы представляютъ какъ бы посредствующее звено между чисто-температурнымъ свѣченіемъ и луминесценціею цвѣтныхъ паровъ. Въ нихъ температурное свѣченіе и луминесценція соединяются вмѣстѣ, хотя первое—вслѣдствіе очень высокой температуры твердыхъ электродовъ—и преобладаетъ.

Въ ртутной лампѣ Аронса температурное свѣченіе повидимому вовсе исключено. Съ этою луминесцирующею лампою мы приближаемся къ свѣченію гейслеровской трубки, свѣтящагося жучка и т. п. и притомъ въ технически примѣнимой формѣ.

23. *Заключеніе.* Наши измѣренія лучей показываютъ, что въ области практическаго, особенно электротехническаго искуства освѣщенія остается еще очень много сдѣлать. Только обширныя опытныя изслѣдованія могутъ рѣшить вопросъ о томъ существуетъ-ли идеальное лучеиспускающее вещество, которое удовлетворяетъ обѣимъ цѣлямъ освѣтительной техники. Замѣтимъ только, какое бы огнеупорное вещество мы ни нашли впослѣдствіи, нагрѣвать его выше температуры солнца не придется. Какъ мы уже видѣли, наиболѣе яркіе лучи солнца лежатъ въ видимой части его спектра, именно въ желто зеленой,

для которой нашъ глазъ наиболѣе чувствителенъ. По ур-ію (2) положеніе этой наибольшей яркости соотвѣтствуетъ температурѣ въ 6000°. Слѣдовательно, если температура тѣла превыситъ 6000°, то его maximum энергіи перемѣщается къ фіолетовой части спектра, гдѣ нашъ глазъ менѣе чувствителенъ, и при 7400° переходитъ наконецъ въ ультрафіолетовую часть, гдѣ глазъ ничего не видитъ.

Такимъ образомъ 6000° должно быть предѣломъ въ нашемъ стремленіи повысить температуру свѣтящаго тѣла. Когда мы достигнемъ этой температуры, тогда будемъ въ состояніи конкурировать съ солнцемъ и превращать ночь въ день!

Механическая мастерская при физическомъ кабинетѣ.

Ж. Лемуана [1].



1. Обработка металловъ на тискахъ.

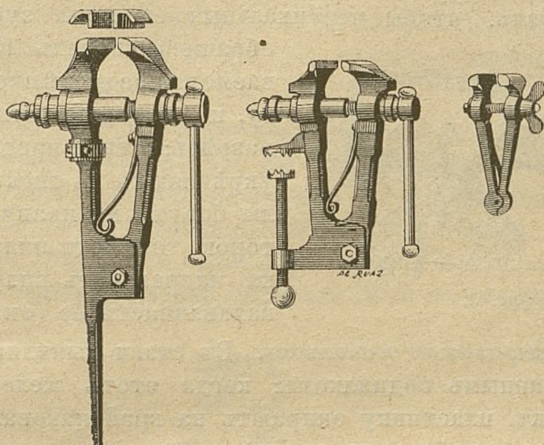
1. *Тиски.* Тиски стуловые (фиг. 1, *A*) укрѣпляются на крѣпкомъ верстакѣ вблизи окна; щеки въ тискахъ покрываются свинцовыми пластинками; тиски столовые (*B*) меньшихъ размѣровъ укрѣпляются на краю какого-нибудь стола. Ручные тиски (*C*) служатъ для захвата мелкихъ предметовъ.

2. *Подпилки.* Смотря по роду работы, употребляютъ подпилки: плоскіе (фиг. 2, *A*), полукруглые (*B*), круглые (*C*) или трехгранные (*D*). Надо имѣть цѣлый наборъ подпилковъ каж-

---

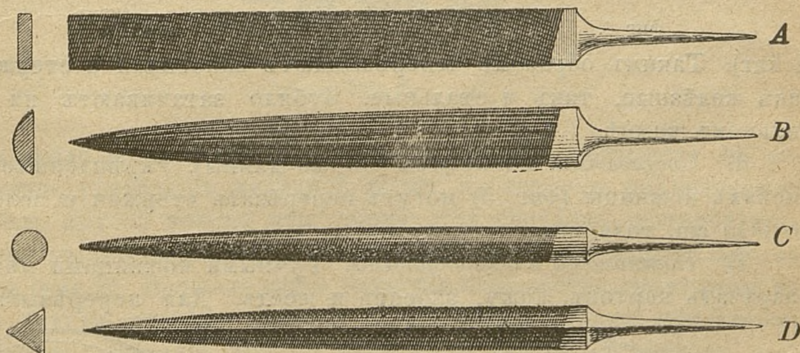
[1]) Въ первомъ номерѣ настоящаго тома *Физическаго Обозрѣнія* помѣщена часть главы „Travaux d'atelier" изъ книги Абрагама „Recueil d'expériences élémentaires de Physique"; съ разрѣшенія автора и издателя мы дадимъ полный переводъ этой главы, составленной Ж. Лемуаномъ (Jules Lemoine, professeur au lycée Louis-le-Grand) по курсу ручнаго труда, организованнаго въ École Normale supérieure въ Парижѣ.

дой формы, насѣчка коихъ постепенно становится мельче. Ихъ употребляютъ въ такой послѣдовательности: 1) драчевый под-



фиг. 1.

пилокъ (30 ст. длины) для грубой обработки, 2) подпилокъ средней насѣчки (20 ст.), 3) личневый подпилокъ (20 ст.) и 4) шлифной

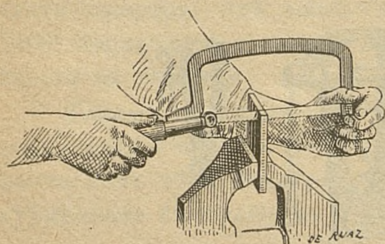


фиг. 2.

(20 ст.); подъ конецъ полируютъ наждачною или карборундовою бумагою. Для упражненія сдѣлать плоскую поверхность въ стержнѣ діаметромъ 2 ст.

3. *Перерѣзать пластинку или металлическій стержень.*

a) *Пилою.* Надо имѣть двѣ пилы для металловъ—одну для латуни, другую для желѣза. Зазубренная лента (длина 18 cm.) вставлена такъ, чтобы вертикальныя стороны зубьевъ были обращены впередъ. На перепиливаемомъ предметѣ проводятъ черту, по которой хотятъ сдѣлать разрѣзъ; затѣмъ предметъ прочно укрѣпляютъ въ тиски. Ручку пилы берутъ въ правую руку, которою толкаютъ пилу; лѣвая рука направляетъ пилу спереди и надавливаетъ ее (фиг. 3).



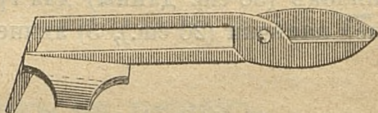
фиг. 3.

b) *Трехграннымъ подпилкомъ.* Въ стали выпиливаютъ желобокъ трехграннымъ подпилкомъ; когда этотъ желобокъ достаточно глубокъ, пластинку опираютъ на край наковальни и ударомъ молотка перебиваютъ на двѣ части.

c) *Зубиломъ.* Конецъ зубила (фиг. 4) опираютъ на намѣченную черту и по головкѣ его ударяютъ тяжелымъ молоткомъ



фиг 4.

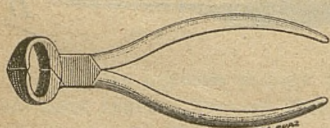


фиг. 5.

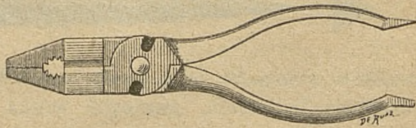
(1 kgr). Такимъ образомъ перерѣзываютъ пластинки и стержни, какъ желѣзные, такъ и стальные. Зубило затачиваютъ на точильномъ камнѣ.

d) *Стуловыми ножницами* (60 cm. длины). Укрѣпленные въ тискахъ ножницы (фиг. 5) могутъ перерѣзать стержни и полосы до 0·15 cm. толщины.

e) *Ножницами и острогубцами.* Ручными ножницами можно разрѣзать картонъ, кожу, азбестъ и жесть. Для перерѣзыванія



фиг. 6.



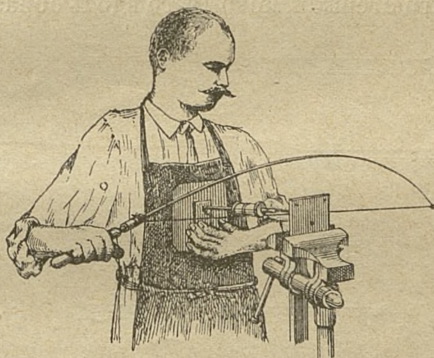
фиг. 7.

проволокъ (проводниковъ тока) употребляютъ острогубцы обыкновенные (фиг. 6) или универсальные (фиг. 7). Прежде, чѣмъ

перерѣзывать проволоку изъ закаленной стали, ее слѣдуетъ отпустить, нагрѣвъ на пламени свѣчи.

4. *Заточить пилу для металловъ.* Пилу укрѣпляютъ въ тискахъ зубцами вверхъ и разводкою отгибаютъ (разводятъ) зубцы послѣдовательно въ ту и въ другую сторону; затѣмъ трехграннымъ подпилкомъ затачиваютъ.

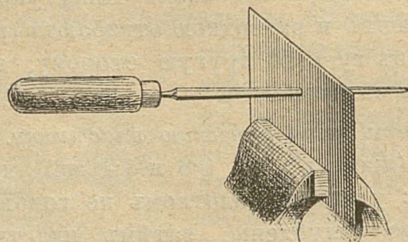
5. *Просверлить металлическую пластинку.* Сначала стальнымъ кернеромъ (діаметръ 0·5, 0·8 и 1·1 cm.) дѣлаютъ въ пластинкѣ углубленіе: ударивъ молоткомъ по головкѣ кернера, получаютъ коническое углубленіе; затѣмъ пластинку просверливаютъ или на токарномъ станкѣ (см. ниже), или же при помощи смычковаго сверла, бичевка котораго (0·25 cm. толщины) обер-



фиг. 8.

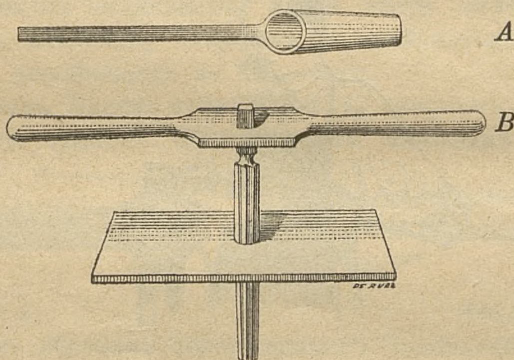
нута около ролика; одинъ конецъ оси ролика упирается въ коническое углубленіе желѣзной доски, на которую надавливаютъ грудью; другой конецъ оси образуется сверломъ, которое упирается въ просверливаемую пластинку, зажатую вертикально въ тиски (фиг. 8). Вращательное движеніе вызывается движеніемъ въ ту и другую сторону смычка; сверло рѣжетъ только при одномъ изъ этихъ движеній. Иногда смычковое сверло замѣняютъ дрилью или коловоротомъ. Кожу, обыкновенный картонъ, азбестовый картонъ, жесть и т. п., продырявливаютъ пробойникомъ (фиг. 10, A) (наборъ пробойниковъ съ возростающимъ діаметромъ на миллиметръ отъ 4 до 18 mm). Продырявливаемый предметъ кладется на торцевую сторону обрубка дерева; достаточно одного или двухъ ударовъ по пробойнику, чтобы выбить кружокъ.

6. *Расширить дыру.* Діаметръ дыры увеличиваютъ при помощи развертки (фиг. 9)—многограннаго слегка расширяюща-



фиг. 9.

гося стержня съ острыми краями—или же фрезера (фиг. 10, B)—слегка коническаго стержня, покрытаго вдоль образующихъ остры-



фиг. 10.

ми краями. Развертка употребляется для малыхъ дыръ, которымъ она придаетъ слегка коническую форму, и приводится въ движеніе рукою (наборъ развертокъ, діаметръ коихъ возростаетъ по одному миллиметру отъ 0·5 до 7 mm). Фрезеръ употребляется для бо́льшихъ дыръ; его приводятъ въ движеніе съ помошью ключа, пуская масло въ дыру (наборъ фрезеровъ, діаметръ коихъ возростаетъ по одному миллиметру отъ 5 до 20 mm).

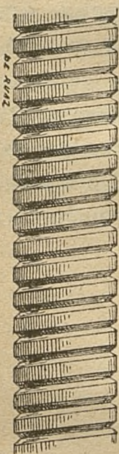
7. *Нарѣзать гайку.* Предварительно должна быть просверлена дыра, діаметръ которой равенъ діаметру метчика (фиг. 11) безъ глубины нарѣзки (наборъ метчиковъ, діаметръ коихъ возростаетъ по миллиметру отъ 1 mm. до 6 mm., затѣмъ по два миллиметра до 14 mm.). Метчикъ, укрѣпленный въ ручные тиски или въ ключъ, ввинчивается въ дыру (пускать масло); нарѣзка готова,

когда весь метчикъ пройдетъ. Соотвѣтствующій винтъ или нарѣзанный стержень долженъ въ точности входить въ нарѣзку гайки. Въ мастерской должны быть въ запасѣ металлическіе винты (желѣзные и латунные), соответствующіе каждому метчику до діаметра въ 6 mm. Для каждаго набора (сверлъ, гаекъ, винтовъ) имѣется еще второе сверло съ діаметромъ равнымъ полному діаметру винта; имъ дѣлаютъ дыру въ пластинкѣ, которую свинчиваютъ съ другою.

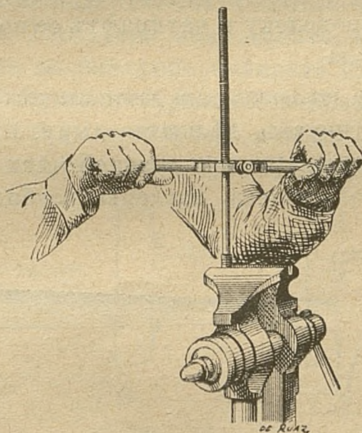


фиг. 11.

8. *Нарѣзать винтъ.* Клупъ (фиг. 13) состоитъ изъ ключа, въ вырѣзкѣ котораго вставляются плашки, т. е. стальная гайка, разрѣзанная пополамъ. Нарѣзаемый стержень укрѣпляется вертикально въ тискахъ; верхній его конецъ зажимается между



фиг. 12.



фиг. 13.

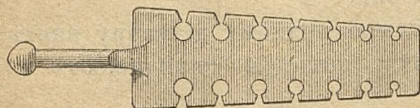


фиг. 14.

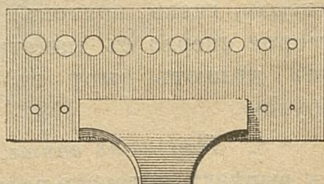
плашками. При повертываніи клупа вокругъ стержня, онъ вмѣстѣ съ тѣмъ опускается внизъ; вращая клупъ въ обратную сторону, поднимаютъ его вверхъ; затѣмъ, сблизивъ плашки боковымъ нажимнымъ винтомъ, повторяютъ движеніе внизъ и вверхъ, пока нарѣзка не будетъ готова и винтъ не будетъ входить въ гайку, которую изготовляютъ сначала. На фиг. 12 представленъ винтъ послѣ перваго нарѣзанія, на фиг. 14—въ окончательномъ видѣ. Винторѣзная доска (фиг. 15) — стальная пластинка съ рядомъ гаекъ, снабженныхъ каждая прорѣзомъ до края плас-

тинки — употребляется, какъ клупъ, для нарѣзыванія малыхъ и тонкихъ стержней.

9. *Вытянуть проволоку.* Волочильная доска (крайніе діаметры отверстій 0·2 и 2·5 mm.) укрѣпляется въ тискахъ (фиг. 16). Заостривъ конецъ проволоки, втыкаютъ его въ отверстія съ ши-



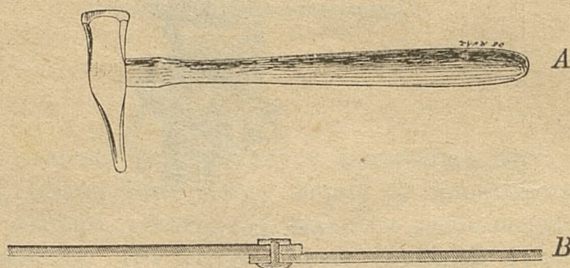
Фиг. 15.



Фиг. 16.

рокой стороны, и, захватывая плоскогубцами, протягиваютъ проволоку чрезъ все болѣе и болѣе мелкія отверстія. Время отъ времени отжигать проволоку и натираютъ ее воскомъ или саломъ, чтобы она не заѣдала.

10. *Соединить заклепкою двѣ металлическихъ пластинки.* Въ соединяемыхъ пластинкахъ дѣлаютъ дыру, въ которую вставляютъ заклепку (изъ желѣза или красной мѣди въ 1, 2, 3 и 4 mm.) съ головкою; другой конецъ заклепки разбиваютъ кузнечнымъ

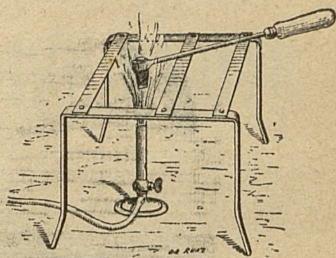


Фиг. 17.

молоткомъ (фиг. 17, *A*), сначала клинообразнымъ концомъ, а потомъ плоскимъ основаніемъ, и образуютъ другую головку заклепки (фиг. 17, *B*).

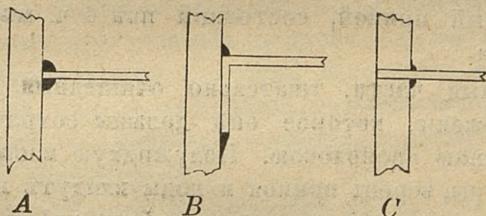
11. *Паяніе оловомъ.* Спаиваемыя части, тщательно пригнанныя и вычищенныя, смачиваются воднымъ растворомъ хлористаго цинка. Надлежащихъ размѣровъ паяльникъ сильно нагрѣвается (но не до-красна) на большомъ пламени бунзеновской горѣлки

(фиг. 18); предварительно вылуженное остріе паяльника трутъ по куску нашатыря, при чемъ отдѣляется густой бѣлый дымъ, если паяльникъ достаточно нагрѣтъ. Если теперь паяльникъ потерѣть по мягкому припою (1 часть олова и 1 часть свинца), то къ нему пристанетъ нѣсколько капель припоя. Затѣмъ паяльникомъ медленно проводятъ по спаиваемому мѣсту, доводя его до температуры плавленія олова; тогда припой сходитъ съ паяльника и заливаетъ щели между соединяемыми металлическими частями.



фиг. 18.

Такъ какъ мягкій припой не отличается крѣпостью, то спаивыемая части, должны быть пригнаны такъ, чтобы онѣ спаивались по значительной поверхности и чтобы былъ какой-нибудь упоръ помимо спая. Такъ, если надо спаять двѣ проволоки подъ прямымъ угломъ, то не слѣдуетъ спаивать ихъ, притыкая одну къ другой (фиг. 19 *А*), но необходимо конецъ одной проволоки отогнуть и затѣмъ этотъ отогнутый конецъ припаять къ другой проволокѣ (*В*) или, что еще лучше, просверлить одну про-

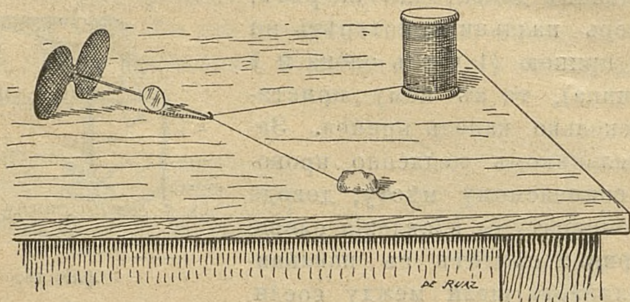


фиг. 19.

волоку, вставить въ отверстіе другую проволоку и затѣмъ припаять (*С*).

Если къ стрѣлкѣ гальванометра или электрометра надо припаять проволочку (серебряную въ нѣсколько сотыхъ миллиметра толщины), то ее пропускаютъ чрезъ крючекъ стрѣлки и конецъ ея прикрѣпляютъ мягкимъ воскомъ къ столу (фиг. 20). На спаиваемыя части кладутъ съ паяльника каплю канифоли, (хлористый цинкъ разъѣлъ бы тонкую проволочку); маленькій паяльникъ съ набраннымъ припоемъ прикладываютъ къ соединяемымъ частямъ.

Въ нѣкоторыхъ случаяхъ спаиваемыя части нагрѣваютъ на обыкновенной паяльной горѣлкѣ (смѣсь свѣтильнаго газа съ



фиг. 20.

воздухомъ); припой, положенный въ видѣ мелкихъ зеренъ на очищенный и смоченый растворомъ хлористаго цинка металлъ, будучи достаточно нагрѣть, разливается.

12. *Паяніе твердымъ припоемъ.* Твердый припой бываетъ мѣдный (мѣдь и цинкъ въ равныхъ частяхъ) или серебрянный (двѣ части серебра и одна часть латуни); въ Физико-техническомъ Имперскомъ институтѣ въ Шарлоттенбургѣ употребляется твердый припой, состоящій изъ 4 ч. мѣди, 5 ч. цинка и 1 ч. серебра.

Спаиваемыя части, тщательно очищенныя, складываются въ такое положеніе, которое онѣ должны сохранить, и связываются желѣзною проволокою. Полужидкую кашицу изъ мелко истолченой буры, зеренъ припоя и воды кладутъ вдоль шва; все обкладываютъ горящими углями, и затѣмъ пламя паяльной горѣлки направляютъ на кашицу осторожно ее нагрѣвая. Сначала плавится бура, затѣмъ припой. Когда припой потечетъ, нагрѣваніе прекращаютъ. Если спаиваютъ мѣдныя или латунныя части, ихъ не слѣдуетъ нагрѣвать до температуры плавленія этихъ металловъ.